

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.  
КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ.  
ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы №2 по физике  
для студентов всех специальностей  
заочной формы обучения

Воронеж 2022

УДК 53.(07)  
ББК 22.3я73

**Составители:** канд. техн. наук Д. Ю. Золототрубов,  
канд. физ.-мат. наук Е. П. Татьянанина,  
канд. физ.-мат. наук А. И. Никишина,  
канд. физ.-мат. наук В. Г. Санников,  
д-р хим. наук Е. А. Тутов

**Электромагнетизм. Колебания и волны. Квантовая природа излучения. Элементы квантовой механики и ядерной физики:** методические указания к выполнению контрольной работы №2 по физике для студентов всех специальностей заочной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Д. Ю. Золототрубов, А. И. Никишина, Е. А. Тутов, Е. П. Татьянанина, Е. В. Алексеева. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. 44 с.

В методических указаниях изложены требования по оформлению контрольной работы по физике, приведены условия задач с разбивкой по вариантам, содержится краткий теоретический материал по темам «Электромагнетизм», «Колебания и волны», «Квантовая природа излучения. Элементы квантовой механики и ядерной физики».

Предназначены для студентов всех специальностей заочной формы обучения, изучающих физику по двухсеместровому курсу.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ\_Эл\_магнетизм.pdf.

Ил. 11. Библиогр.: 4 назв.

УДК 53.(07)  
ББК 22.3я73

**Рецензент** – А. Г. Москаленко, канд. физ.-мат. наук, доц.  
кафедры физики ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса физики в техническом вузе большое внимание уделяется решению физических задач, что позволяет глубже понимать изучаемые явления и законы физики, развивать аналитическое мышление.

- При обучении в заочной форме большая часть времени выделена на самостоятельную работу. Для контроля уровня усвоения материала, предлагается выполнение контрольной работы, которая включает в себя 10 задач по темам, изучаемым в текущем семестре.

К оформлению контрольной работы существуют следующие требования:

1. Контрольная работа выполняется письменно в тетради (12-18 листов, в клетку). Титульный лист подписывается по образцу (разборчиво!):

*Контрольная работа №1 по физике  
студента факультета РТЭ, группы збБСТ-221  
Шифр (номер зачетной книжки) № 22-збБСТ-10  
Иванова Ивана Ивановича*

2. Номера вариантов и задач определяются в соответствии последней цифрой шифра зачетной книжки по таблице (цифре ноль будет соответствовать вариант №10).

3. Условия задач переписываются полностью без сокращений. Необходимо сделать краткую запись условия, при этом числовые данные перевести в систему единиц СИ.

4. Выполнить аккуратно чертеж, рисунок или схему, поясняющие описанный в задаче процесс.

5. В ходе решения задачи делать краткие и ясные комментарии используемых физических законов и формул.

6. Решив задачу в общем виде, проверить ответ по равенству размерностей левой и правой части расчетной формулы.

7. В полученную расчетную формулу подставить числовые данные и оценить правдоподобность ответа.

8. Оставлять поля для замечаний преподавателя.

9. Оформленную контрольную работу представить на проверку не позднее, чем за две недели до начала сессии на кафедру физики по адресу: г. Воронеж, Московский пр. 14, ауд. 204 или ауд. 329. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан представить её на повторную рецензию, включив в неё те задачи, решения которых оказались неверными.

## Таблица вариантов

Таблица

Вариант	Номер задачи									
1	1	20	29	38	47	56	65	74	83	92
2	2	11	30	39	48	57	66	75	84	93
3	3	12	21	40	49	58	67	76	85	94
4	4	13	22	31	50	59	68	77	86	95
5	5	14	23	32	41	60	69	78	87	96
6	6	15	24	33	42	51	70	79	88	97
7	7	16	25	34	43	52	61	80	89	98
8	8	17	26	35	44	53	62	71	90	99
9	9	18	27	36	45	54	63	72	81	100
10	10	19	28	37	46	55	64	73	82	91

### 1. Законы и формулы к решению задач по теме «Электромагнетизм»

#### Магнитное поле

Связь магнитной индукции  $B$  с напряженностью  $H$  магнитного поля:

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

где  $\mu$  — магнитная проницаемость изотропной среды;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

В вакууме  $\mu = 1$  и тогда магнитная индукция в вакууме

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}.$$

Закон Био-Савара-Лапласа:

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

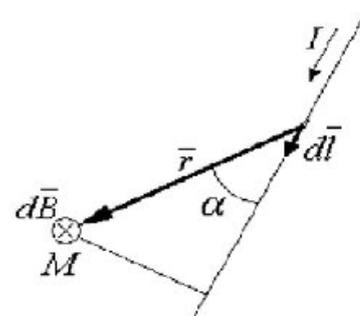


Рис. 1.1.

или в скалярной форме

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

где  $dB$  — магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника длиной  $d$  с током  $I$ ;  $r$  — радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой вычисляется магнитная индукция;  $\alpha$  — угол между радиусом-вектором и направлением тока в элементе проводника (рис. 1.1).

Магнитная индукция в центре кругового тока:

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

где  $R$  – радиус кругового витка.

Магнитная индукция на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu_0 \mu 2\pi R^2 I}{4\pi(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

где  $h$  – расстояние от центра витка до точки, в которой вычисляется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля прямого бесконечного тока:

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

где  $r$  – расстояние от оси проводника до точки, в которой вычисляется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком провода с током:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2),$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы, образованные проводником с током и радиусами-векторами, проведенными из концов проводника в точку  $M$  (рис. 1.2);  $r$  – расстояние от проводника до точки  $M$ , в которой вычисляется магнитная индукция.

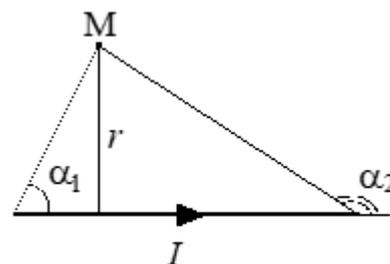


Рис.1.2.

Магнитная индукция поля соленоида:

$$B = \mu_0 \mu n I,$$

где  $n$  – число витков соленоида, приходящееся на единицу длины соленоида.

Сила Ампера – сила взаимодействия проводника с током и магнитного поля:

$$\mathbf{F} = I[\mathbf{l}, \mathbf{B}], \quad F = I\ell B \sin \alpha,$$

где  $\ell$  – длина проводника,  $\alpha$  – угол между проводником и вектором магнитной индукции. Направление силы Ампера можно определить по правилу левой руки.

Магнитный момент контура с током:

$$\mathbf{p}_m = I\mathbf{S},$$

где  $I$  — сила тока, протекающего по контуру;  $S$  — площадь контура; вектор  $\mathbf{S}$  численно равен площади  $S$  контура и совпадает по направлению с вектором нормали к плоскости контура.

Если магнитное поле создается рамкой, имеющей несколько витков, то необходимо просуммировать магнитные моменты, создаваемые отдельными витками. Если площади всех витков одинаковы, то

$$\mathbf{p}_m = INS.$$

Механический (вращательный) момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m, \mathbf{B}], \quad M = p_m B \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $p_m$  и  $B$ .

Сила Лоренца:

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}], \quad F = qvB \sin \alpha,$$

где  $v$  — скорость заряженной частицы;  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ .

Магнитный поток:

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad \Phi = B_n S,$$

где  $S$  — площадь контура;  $\alpha$  — угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции.

Для вычисления потока через поверхность сложной формы, такую, например, как поверхность, ограниченную витками катушки, следует найти потоки через отдельные участки поверхности (витки), а затем сложить эти потоки. Если катушка находится в однородном поле и все  $N$  витков имеют одинаковую площадь, то магнитный поток можно найти по формуле

$$\Phi = NBS \cos \alpha.$$

Работа по перемещению замкнутого контура в магнитном поле:

$$A = I \Delta \Phi.$$

### Электромагнитная индукция

ЭДС индукции (закон Фарадея):

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

Разность потенциалов на концах проводника, движущегося со скоростью в магнитном поле:

$$U = B\ell v \sin \alpha,$$

где  $\ell$  — длина проводника;  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ .

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R}, \quad q = \frac{N \Delta\Phi}{R},$$

где  $R$  — сопротивление контура,  $N$  — число витков.

ЭДС самоиндукции:

$$E_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Индуктивность соленоида:

$$L = \mu_0 \mu n^2 V,$$

где  $n$  — число витков, приходящееся на единицу длины соленоида;  $V$  — объем соленоида.

Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$ :

а) при замыкании цепи:

$$I = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right),$$

где  $E$  — ЭДС источника тока;  $t$  — время, прошедшее после замыкания цепи;

б) при размыкании цепи:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t},$$

Где  $I_0$  — значение силы тока в цепи при  $t = 0$ ;  $t$  — время, прошедшее с момента размыкания цепи.

Энергия магнитного поля:

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

Объемная плотность энергии магнитного поля (энергия, заключенная в единицу объема):

$$w = \frac{1}{2}BH, \quad w = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0\mu}, \quad w = \frac{1}{2} \mu_0\mu H^2,$$

где  $B$  – магнитная индукция;  $H$  – напряженность магнитного поля.

### Примеры решения задач

**Пример 1.1.** Два параллельных бесконечно длинных провода D и C, по которым текут в одном направлении токи силой  $I = 60$  А расположены на расстоянии  $d = 10$  см друг от друга. Определить индукцию магнитного поля в точке A, отстоящей от одного проводника на расстоянии  $r_1 = 5$  см и от другого на расстоянии  $r_2 = 12$  см.

Дано:

$$I = 60 \text{ А}$$

$$d = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$r_1 = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$$

$$r_2 = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$$

Найти:  $B$

Решение

Для нахождения индукции магнитного поля  $B$  в указанной точке A (рис. 1.3) определим направление векторов индукции  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  полей, создаваемых каждым проводником в отдельности, и сложим их геометрически (по правилу параллелограмма), т.е.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2.$$

Абсолютное значение индукции  $B$  может быть найдено по теореме косинусов:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha}, \quad (1.1.1)$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$ .

Значение индукций  $B_1$  и  $B_2$  выражаются соответственно через силу тока  $I$  и расстояния  $r_1$  и  $r_2$  от проводов до точки A, индукцию поля в которой мы вычисляем:

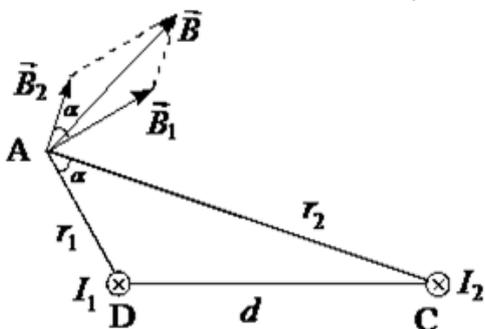


Рис. 1.3.

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1}, \quad B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2}.$$

Подставляя  $B_1$  и  $B_2$  в формулу (1.1.1) и вынося  $\mu_0 I / 2\pi$  за знак корня, получим:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2 \cos \alpha}{r_1 r_2}}. \quad (1.1.2)$$

Вычислим  $\cos \alpha$ . По теореме косинусов из треугольника ABC имеем:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \alpha,$$

где  $d$  — расстояние между проводниками.

Отсюда

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1 r_2},$$

или

$$\cos \alpha = \frac{5^2 + 12^2 - 10^2}{2 \cdot 5 \cdot 12} = \frac{23}{40}.$$

Подставляя в формулу (1.1.2) значения  $I$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  и значение  $\cos \alpha$ , определяем искомую индукцию:

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1}{(0,05)^2} + \frac{1}{(0,12)^2} + \frac{2}{0,05 \cdot 0,12} \frac{23}{40}} = 3,08 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Ответ:  $B = 3,08 \cdot 10^{-4}$  Тл.

**Пример 1.2.** Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $U = 400$  В, попал в однородное магнитное поле напряженностью  $H = 10^3$  А/м. Определить радиус  $R$  кривизны траектории и частоту  $n$  обращения электрона в магнитном поле. Вектор скорости перпендикулярен линиям поля.

Дано:

$$U = 400 \text{ В}$$

$$H = 10^3 \text{ А/м}$$

Найти:  $R$ ,  $n$

Решение

Радиус кривизны траектории электрона определим, исходя из следующих соображений: на движущийся в магнитном поле электрон действует сила Лоренца  $F_L$  (действием силы тяжести можно пренебречь). Сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости и, следовательно, сообщает электрону нормальное ускорение:

$$F = ma_n,$$

или

$$evB = \frac{mv^2}{R}. \quad (1.2.1)$$

Из формулы (1.2.1) найдем

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (1.2.2)$$

Входящий в равенство (1.2.2) импульс  $mv$  может быть выражен через кинетическую энергию  $T$  электрона:

$$mv = \sqrt{2mT}. \quad (1.2.3)$$

Но кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоренную разность потенциалов  $U$ , определяется равенством

$$T = eU.$$

Подставив это выражение  $T$  в формулу (1.2.3), получим:

$$mv = \sqrt{2meU}.$$

Магнитная индукция  $B$  может быть выражена через напряженность  $H$  магнитного поля в вакууме соотношением:

$$B = \mu_0 H,$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Подставляя найденные выражения  $B$  и  $mv$  в формулу (1.2.2), определим:

$$R = \frac{\sqrt{2meU}}{\mu_0 eH}. \quad (1.2.4)$$

Произведем вычисления:

$$R = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 400}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3} = 5,37 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 5,37 \text{ см.}$$

Для определения частоты обращения  $n$  воспользуемся формулой, связывающей частоту со скоростью и радиусом:

$$n = \frac{v}{2\pi R}. \quad (1.2.5)$$

Подставив в формулу (1.2.5) выражение (1.2.2) для радиуса кривизны, получим:

$$n = \frac{1}{2\pi} \frac{e}{m} B,$$

Или

$$n = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{e}{m} H.$$

Подставим их и произведем вычисления:

$$n = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot 10^3 = 3,52 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}.$$

Ответ:  $n = 3,52 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ .

**Пример 1.3.** Плоский квадратный контур со стороной  $a = 10$  см, по которому течет ток  $I = 100$  А, свободно установился в однородном магнитном поле  $B = 1$  Тл. Определить работу  $A$ , совершаемую внешними силами при повороте контура относительно оси, проходящей через середину его противоположных сторон, на угол: 1)  $\varphi_1 = 90^\circ$ ; 2)  $\varphi_2 = 3^\circ$ . При повороте контура сила тока в нем поддерживается неизменной.

Дано:  
 $a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$   
 $I = 100 \text{ А}$   
 $B = 1 \text{ Тл}$   
 $\varphi_1 = 90^\circ$   
 $\varphi_2 = 3^\circ$   
 Найти:  $A_1, A_2$

### Решение

Как известно, на контур с током в магнитном поле действует момент сил:

$$M = p_m B \sin \varphi. \quad (1.3.1)$$

По условию задачи, в начальном положении контур свободно установился в магнитном поле. При этом момент сил равен нулю ( $M = 0$ ), а значит  $\varphi = 0$ , т.е. векторы  $p_m$  и  $B$  совпадают по направлению.

Если внешние силы выведут контур из положения равновесия, то возникший момент сил, определяемый формулой (1.3.1), будет стремиться возвратить контур в исходное положение. Против этого момента и будет совершаться работа внешними силами. Так как момент сил переменный (зависит от угла поворота  $\varphi$ ), то для подсчета работы применим формулу работы в дифференциальной форме:

$$dA = Md\varphi.$$

Подставив сюда выражение  $M$  по формуле (1.3.1) и учтя, что  $p_m = IS = Ia^2$ , где  $I$  – сила тока в контуре;  $S = a^2$  – площадь контура, получим:

$$dA = IBa^2 \sin \varphi d\varphi.$$

Взяв интеграл от этого выражения, найдем работу при повороте на конечный угол:

$$A = IBa^2 \int_0^\varphi \sin \varphi d\varphi. \quad (1.3.2)$$

1) Работа при повороте на угол  $\varphi_1 = 90^\circ$ :

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi = -IBa^2 \cos \varphi \Big|_0^{\pi/2} = IBa^2. \quad (1.3.3)$$

Подставляя в полученную формулу числовые значения, получим:

$$A_1 = 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 = 1 \text{ Дж.}$$

2) Работа при повороте на угол  $\varphi_2 = 3^\circ$ . В этом случае, учитывая, что угол  $\varphi_2$  мал, в выражении (1.3.2) значение синуса можно заменить значением угла, выраженным в радианах, то есть  $\sin \varphi \approx \varphi$ :

$$A_2 = IBa^2 \int_0^{\varphi_2} \varphi d\varphi = \frac{1}{2} IBa^2 \varphi_2^2. \quad (1.3.4)$$

Переведем угол  $\varphi_2 = 3^\circ$  в радианы:

$$\varphi_2 = \frac{3^\circ \cdot 3,14}{180^\circ} = 0,0524 \text{ рад.}$$

После подстановки числовых значений величин в (1.3.4) найдем:

$$A_2 = \frac{1}{2} 100 \cdot 1 \cdot (0,1)^2 \cdot (0,0524)^2 = 1,37 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 1,37 \text{ мДж.}$$

Ответ:  $A_1 = 1 \text{ Дж}$ ;  $A_2 = 1,37 \text{ мДж}$ .

**Пример 1.4.** В однородном магнитном поле  $B = 0,1 \text{ Тл}$  равномерно с частотой  $n = 10 \text{ об/с}$  вращается рамка, содержащая  $N = 1000$  витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь рамки  $S = 150 \text{ см}^2$ . Определить мгновенное значение ЭДС индукции, соответствующее углу поворота рамки в  $30^\circ$ .

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$n = 10 \text{ об/с}$$

$$N = 1000$$

$$S = 150 \text{ см}^2 = 0,015 \text{ м}^2$$

$$\varphi = 30^\circ$$

Найти:  $E_i$

Решение

Мгновенное значение ЭДС индукции  $E_i$  определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла:

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.4.1)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток через рамку.

В однородном поле поток через рамку, имеющую  $N$  витков, плотно прилегающих друг к другу, можно выразить соотношением:

$$\Phi = NBS \cos \alpha, \quad (1.4.2)$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $S$  — площадь рамки.

При вращении угол  $\alpha$  можно выразить через частоту вращения по формуле

$$\alpha = \omega t = 2\pi n t.$$

Подставим в формулу (1.4.2) выражение  $\alpha$ , а получившуюся формулу для  $\Phi$  подставим в (1.4.1):

$$E_i = -\frac{d(NBS \cos(2\pi n t))}{dt}.$$

Продифференцировав получившееся выражение по времени, найдем мгновенное значение ЭДС индукции:

$$E_i = NBS2\pi m \sin(2\pi t). \quad (1.4.3)$$

Выражение, стоящее под знаком синуса является фазой  $\varphi$ , поэтому можно не определять момент времени, в который вычисляется ЭДС, а сразу подставить значение фазы из условия.

Подставим в (1.4.3) числовые данные, получим:

$$E_i = 10^3 \cdot 0,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,5 = 47,1 \text{ В.}$$

Ответ:  $E_i = 47,1 \text{ В.}$

## 2. Законы и формулы к выполнению задач по теме «Колебания и волны»

### Колебания

Уравнение гармонических колебаний:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $x$  – значение изменяющейся физической величины в момент времени  $t$ ,  $A$  – амплитуда колебания,  $\omega_0 t + \varphi_0$  – полная фаза колебания,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\omega_0$  – собственная круговая частота колебания.

Скорость при гармонических колебаниях:

$$v = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Ускорение при гармонических колебаниях:

$$a = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Дифференциальное уравнение гармонических колебаний:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0.$$

Период и частота колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{\ell}},$$

где  $\ell$  — длина нити,  $g$  — ускорение свободного падения.

Период и частота колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mg\ell}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{mg\ell}{J}},$$

где  $J$  — момент инерции тела относительно оси вращения,  $m$  — масса тела,  $a$  — расстояние от центра инерции (центра масс) до оси вращения.

Период и частота колебаний упругой системы:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где  $m$  — масса тела,  $k$  — жесткость пружины.

Период электрических колебаний в идеальном электрическом контуре (формула Томсона):

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

где  $L$  — индуктивность,  $C$  — (электро)емкость контура.

Полная энергия гармонических колебаний:

а) для механических колебаний:

$$W = \frac{mA^2\omega_0^2}{2};$$

б) для электрических колебаний:

$$W = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2C}.$$

Уравнение затухающих механических колебаний:

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $A_0$  — начальная амплитуда,  $A(t) = A_0 e^{-\delta t}$  — амплитуда затухающих колебаний в момент времени  $t$ ,  $\omega$  — частота затухающих колебаний,  $\varphi_0$  — начальная фаза,  $\delta$  — коэффициент затухания.

Частота затухающих колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

где  $\omega_0$  – частота свободных незатухающих колебаний.

Логарифмический декремент затухания:

$$\Theta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}},$$

где  $A_n$  и  $A_{n+1}$  – две соседние амплитуды колебаний одного знака.

Связь логарифмического декремента с коэффициентом затухания:

$$\Theta = \delta T = \frac{2\pi\delta}{\omega},$$

где  $T$  – период затухающих колебаний,  $\omega$  – частота затухающих колебаний.

Для затухающих электрических колебаний:

$$\delta = \frac{R}{2L}.$$

### Волновая оптика

Абсолютный показатель преломления среды

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

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость распространения света в вакууме,  $v$  – скорость распространения света в среде.

Оптический ход светового луча (оптическая длина пути):

$$L = n\ell,$$

где  $\ell$  – геометрический ход луча.

Оптическая разность хода двух волн:

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

Условие усиления света при интерференции волн от двух когерентных источников:

$$\Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2},$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего света,  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Условие ослабления при интерференции двух волн:

$$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Линейное расстояние между соседними интерференционными максимумами или минимумами на экране, расположенном параллельно двум когерентным источникам света:

$$\delta = \frac{\ell}{d}\lambda,$$

где  $\ell$  – расстояние от когерентных источников волн до экрана,  $d$  – расстояние между источниками волн (при этом  $\ell \ll d$ ),  $\lambda$  – длина волны, излучаемая источниками.

Оптическая разность хода световых волн при интерференции на тонких пленках (или пластинках) в отраженном свете:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad \Delta = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2},$$

где  $d$  – толщина пленки,  $i$  – угол падения лучей на пленку,  $r$  – угол преломления лучей в пленке,  $n$  – показатель преломления пленки.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете:

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

где  $R$  – радиус сферической поверхности,  $k = 1, 2, \dots$ .

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете:

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}.$$

В проходящем свете расположение светлых и темных колец обратно их расположению в отраженном свете.

Условие максимума дифракции света от одной щели, на которую нормально падает пучок параллельных лучей, определяется условием:

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

где  $a$  – размер щели,  $\varphi$  – угол дифракции,  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Условие минимума дифракции света от одной щели:

$$a \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Условие максимума дифракции света на дифракционной решетке (при нормальном падении света на решетку):

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

где  $d$  – постоянная (период) решетки,  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Разрешающая способность дифракционной решетки:

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

где  $\Delta \lambda$  – наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий ( $\lambda$  и  $\lambda + \Delta \lambda$ ), при которой эти линии могут отдельно наблюдаться в спектре, полученном с помощью данной решетки,  $N$  – полное число щелей решетки.

Угловая дисперсия дифракционной решетки:

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

Формула Вульфа-Брэггов для дифракции рентгеновских лучей на кристалле:

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

где  $d$  – расстояние между соседними атомными плоскостями в кристалле,  $\Theta$  – угол скольжения,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения.

Закон Бугера:

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

где  $I_0$  – интенсивность падающего на вещество света,  $I$  – интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной  $a$ ,  $k$  – коэффициент поглощения.

Степень поляризации частично поляризованного света определяется формулой:

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

где  $I_{\max}$  – максимальная интенсивность света, прошедшего через анализатор,  $I_{\min}$  – минимальная интенсивность этого света.

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор, определяется по закону Малюса:

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

где  $I_0$  – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор,  $I$  – интенсивность этого света после прохождения анализатора,  $\varphi$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21},$$

где  $i_B$  – угол падения естественного света, при котором отраженный от диэлектрика свет полностью поляризован (угол Брюстера),  $n_{21} = n_2/n_1$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

### Примеры решения задач

**Пример 2.1.** Определить период колебаний стержня длиной  $l = 30$  см около оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец.

Дано:  
 $l = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$   
 Найти:  $T$

Решение

Стержень, имеющий возможность совершать вращение около горизонтальной оси  $O$ , не проходящей через центр масс (центр тяжести)  $C$ , есть физический маятник (рис. 2.1).

Для физического маятника период колебаний около неподвижной оси:

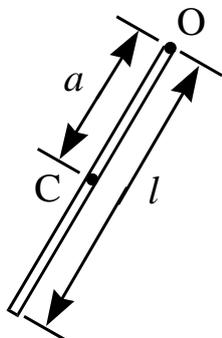


Рис. 2.1

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mga}}, \quad (2.1.1)$$

где  $J$  — момент инерции относительно этой оси,  $m$  — масса маятника,  $a$  — расстояние от оси колебаний до центра тяжести. Момент инерции относительно оси, проходящей через конец стержня можно определить по теореме Штейнера:

$$J = J_c + ma^2, \quad (2.1.2)$$

где  $J_c$  — момент инерции относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр тяжести. Но для стержня момент инерции:

$$J_c = \frac{1}{12} ml^2, \quad (2.1.3)$$

где  $l$  — длина стержня.

Подставим (2.1.3) в (2.1.2), учитывая, что  $a = l/2$  (рис. 2.1):

$$J = \frac{1}{12} ml^2 + m \left( \frac{l}{2} \right)^2 = \left( \frac{1}{12} + \frac{1}{4} \right) ml^2 = \frac{1}{3} ml^2.$$

Подставим полученное выражение в (2.1.1):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3} ml^2}{mg \frac{1}{2} l}} = 2\pi \sqrt{\frac{2l}{3g}}.$$

Подставим значения величин, получим:

$$T = 2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,3}{3 \cdot 9,8}} = 6,28 \cdot \sqrt{0,02} = 0,9 \text{ с.}$$

Ответ:  $T = 0,9 \text{ с.}$

**Пример 2.2.** Колебательный контур имеет емкость  $C = 1,1 \text{ нФ}$  и индуктивность  $L = 5 \text{ мГн}$ . Логарифмический декремент затухания равен  $0,005$ . За какое время вследствие затухания потеряется  $99 \%$  энергии колебаний в контуре?

Дано:

$$C = 1,1 \text{ нФ} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$L = 5 \text{ мГн} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$\Theta = 0,005$$

Найти:  $t$

Решение

Энергию колебаний в контуре можно записать по формуле

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

где  $I$  — максимальное (амплитудное) значение силы тока в контуре. Так как при затухании потерялось  $99 \%$  энергии, то оставшуюся в контуре энергию колебаний можно записать как

$$W_2 = 0,01W_1 \quad \text{или} \quad \frac{LI_2^2}{2} = 0,01 \frac{LI_1^2}{2}.$$

Сократив обе части выражения на  $L/2$  и вычислив квадратный корень получим соотношение для сил токов

$$I_2 = 0,1I_1.$$

Амплитуда затухающих колебаний зависит от времени:

$$A = A_0 e^{-\delta t},$$

где  $A_0$  — начальная амплитуда,  $\delta$  — коэффициент затухания. В нашем случае  $I_1$  — начальная амплитуда,  $I_2$  — конечная амплитуда.

$$I_2 = I_1 e^{-\delta t} \quad \text{или} \quad e^{-\delta t} = 0,1.$$

Прологарифмировав обе части уравнения, найдем время:

$$t = -\frac{\ln 0,1}{\delta}.$$

Коэффициент затухания связан с логарифмическим декрементом затухания по формуле

$$\Theta = \delta T,$$

где  $T$  — период затухающих колебаний. По условию задачи логарифмический декремент мал, поэтому период затухающих колебаний приблизительно равен периоду собственных колебаний контура:

$$T \approx T_0 = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Найдем выражение для коэффициента затухания:

$$\delta = \frac{\Theta}{T} = \frac{\Theta}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Подставим выражение для коэффициента затухания в формулу для времени:

$$t = -\frac{2\pi\sqrt{LC} \ln 0,1}{\Theta}.$$

Подставим в формулу числовые значения:

$$t = -\frac{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^{-9}} \ln 0,1}{0,005} = -\frac{6,28 \cdot 2,35 \cdot 10^{-6} (-2,3)}{0,005} =$$

$$= 0,0068 \text{ с} = 6,8 \text{ мс.}$$

Ответ:  $t = 6,8 \text{ мс.}$

**Пример 2.3.** В просветленной оптике для устранения отражения света на поверхность линзы наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления ( $n = 1,26$ ) меньшим, чем у стекла. При какой наименьшей толщине пленки отражение света от линзы не будет наблюдаться? Длина волны падающего света  $0,55 \text{ мкм}$ , угол падения  $30^\circ$ .

Дано:

$$\lambda = 0,55 \text{ мкм} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$i = 30^\circ$$

$$n = 1,26$$

Найти:  $d_{\min}$

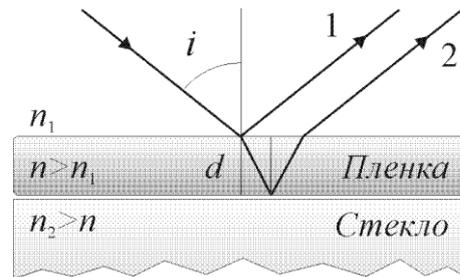


Рис. 2.2

Решение

Лучи 1 и 2 отражаются от среды с большим показателем преломления (рис. 2.2), поэтому как на верхней, так и на нижней поверхности пленки происходит потеря полуволны, и следовательно, оптическая разность хода лучей равна:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$$

Отражения света от линзы не будет, если выполнится условие минимума освещенности при интерференции лучей 1 и 2 (условие минимума интерференции света):

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$

Толщина пленки будет минимальна при  $k = 0$ . Отсюда

$$d_{\min} = \frac{(2k + 1) \lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Подставляя числовые данные, найдем минимальную толщину пленки:

$$d_{\min} = \frac{5,5 \cdot 10^{-6}}{4\sqrt{1,26^2 - \sin^2 30^\circ}} = 1,17 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,117 \text{ мкм.}$$

**Ответ:**  $d_{\min} = 0,117 \text{ мкм.}$

**Пример 2.4.** На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $0,65 \text{ мкм}$ . На экране, расположенном параллельно решетке и отстоящем от нее на расстоянии  $0,5 \text{ м}$ , наблюдается дифракционная картина. Расстояние между дифракционными максимумами первого порядка равно  $10 \text{ см}$ . Определить постоянную дифракционной решетки и общее число максимумов, получаемых с помощью этой решетки.

Дано:  
 $\lambda = 0,65 \text{ мкм} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$   
 $L = 0,5 \text{ м}$   
 $l = 0,1 \text{ м}$   
 $k = 1$

---

Найти:  $d, m$

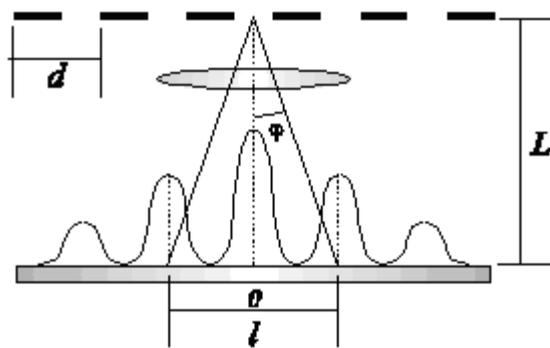


Рис. 2.3

### Решение

Картина распределения интенсивности света на экране при дифракции на решетке показана на рисунке 2.3. Условие максимума интенсивности света на дифракционной решетке:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad (2.4.1)$$

где  $d$  – постоянная (период) решетки,  $\varphi$  – угол дифракции,  $\lambda$  – длина волны падающего света  $k = 0, 1, 2, \dots$  – порядок максимума.

По условию задачи  $\frac{l}{2} \ll L$ , поэтому

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{2L} \dots \quad (2.4.2)$$

Подставляя (2.4.2) в (2.4.1), получим:

$$d \frac{l}{2L} = k \lambda. \quad \text{или} \quad d = \frac{2kL\lambda}{l}. \quad (2.4.3)$$

Вычислим постоянную решетки при  $k = 1$ :

$$d = \frac{2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,5}{0,1} = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 6,5 \text{ мкм.}$$

Для определения общего количества максимумов, получаемых с помощью дифракционной решетки, найдем максимальный порядок дифракции. Максимальный угол отклонения лучей от нормального направления распространения не может превышать  $90^0$ , т.е. формула (2.4.1) примет вид:

$$d = k_{\max} \lambda, \quad \text{откуда} \quad k_{\max} = \frac{d}{\lambda}, \quad (4)$$

тогда

$$k_{\max} = \frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{6,5 \cdot 10^{-7}} = 10.$$

Общее количество максимумов равно:  $m = 2k_{\max} + 1$ , так как слева и справа от центрального ( $k = 0$ ) будут наблюдаться по  $k_{\max}$  максимумов. Окончательно:

$$m = 2 \cdot 10 + 1 = 21.$$

**Ответ:**  $d = 6,5$  мкм;  $m = 21$ .

**Пример 2.5.** Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор (рис. 2.4), уменьшилась в четыре раза? Поглощением света пренебречь.

Дано:

$$I/I_e = 1/4$$

Найти:  $\varphi$

**Решение**

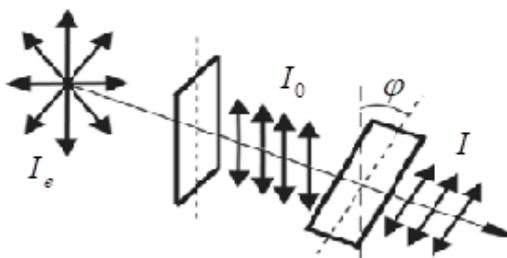


Рис. 2.4

При прохождении через поляризатор интенсивность естественного света уменьшается вдвое:

$$I_0 = \frac{1}{2} I_e,$$

где  $I_e$  – интенсивность естественного света,  $I_0$  – интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

При прохождении света через анализатор интенсивность света уменьшается по закону Малюса:

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

где  $I$  – интенсивность света, вышедшего из анализатора,  $\varphi$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

По условию задачи  $I = I_e/4$ , следовательно:

$$\frac{I_e}{4} = I_0 \cos^2 \varphi = \frac{I_e}{2} \cos^2 \varphi,$$

отсюда

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{2}, \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad \varphi = 45^\circ.$$

**Ответ:**  $\varphi = 45^\circ$ .

### 3. Законы и формулы к выполнению задач по теме «Квантовая природа излучения. Элементы квантовой механики и ядерной физики»

Закон Стефана-Больцмана:

$$R_{\text{э}} = \sigma T^4,$$

где  $R_{\text{э}}$  – интегральная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела (его энергетическая светимость, т.е. энергия, излучаемая в единицу времени единицей поверхности абсолютно черного тела),  $T$  – абсолютная температура

тела,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана  $\left( \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right)$ .

Если излучаемое тело не является абсолютно черным, то

$$R_{\text{э}} = \alpha \sigma T^4,$$

где коэффициент  $\alpha$  всегда меньше единицы.

Закон смещения Вина:

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

где  $\lambda_m$  – длина волны, на которую приходится максимум излучения тела,  $b$  – постоянная Вина ( $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ).

Максимальная спектральная плотность энергетической светимости пропорциональна пятой степени температуры (второй закон Вина):

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

где коэффициент  $\left( C = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{Вт}{м^3 K^5} \right)$ .

Поток излучения абсолютно черного тела:

$$\Phi_{\nu} = R_{\nu} S,$$

где  $S$  – площадь излучаемой поверхности.

Энергия фотона:

$$E = h\nu \quad \text{или} \quad E = \hbar\omega,$$

где  $\nu$  – частота фотона,  $\omega$  – циклическая частота,  $h$  и  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  – постоянная

Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ).

Масса фотона:

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

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Импульс фотона:

$$p = \frac{h\nu}{c}.$$

Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{m_0 v_{\max}^2}{2}, \quad \text{если} \quad \frac{m_0 v_{\max}^2}{2} < 5 \text{ кэВ},$$

$$h\nu = A + T, \quad \text{если} \quad T > 5 \text{ кэВ},$$

где  $A$  – работа выхода электрона из металла,  $v_{\max}$  – максимальная скорость фотоэлектрона,  $m_0$  – масса покоя электрона,  $T$  – кинетическая энергия электрона.

$$T = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\max}^2}{c^2}} - 1} \right).$$

Красная граница фотоэффекта:

$$\lambda_0 = \frac{ch}{A},$$

где  $\lambda_0$  – максимальная длина волны света, при которой еще возможен фотоэффект.

Световое давление:

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

где  $I$  – интенсивность света (энергетическая освещенность),  $\rho$  – коэффициент отражения преграды, на которую падает свет.

Формула Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) \quad \text{или}$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где  $\lambda$  – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабо связанным электроном,  $\lambda'$  – длина волны фотона, рассеянного на угол  $\theta$  после столкновения с электроном,  $m_0$  – масса покоящегося электрона.

Длина волны де Бройля:

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

где  $\lambda$  – длина волны, связанная с частицей, обладающей импульсом  $p$ ,  $v$  – скорость частицы,  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  – масса движущейся частицы,  $m_0$  – масса покоящейся частицы.

Если  $v \ll c$ , то  $\lambda = \frac{h}{m_0 v}$ .

Соотношения неопределенностей Гейзенберга:

а) для координаты и импульса:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar,$$

б) для энергии и времени:

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

где  $\Delta p_x$  – неопределенность проекции импульса на ось  $x$ ,  $\Delta x$  – неопределенность координаты  $x$ ,  $\Delta E$  – неопределенность энергии,  $\Delta t$  – неопределенность времени.

Вероятность обнаружения частицы в интервале от  $x_1$  до  $x_2$ :

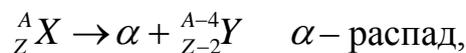
$$\omega = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx,$$

где  $\psi(x)$  – волновая функция частицы,  $|\psi(x)|^2$  – плотность вероятности.

Волновая функция частицы, находящейся в одномерном прямоугольном потенциальном ящике, шириной  $l$ :

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

Законы радиоактивного распада:



где  ${}^A_Z X$  – исходное радиоактивное ядро,  $Z, A$  – зарядовое и массовое числа,  ${}^{A-4}_{Z-2} Y$  и  ${}^A_{Z+1} Y$  – ядра, образовавшиеся в процессе  $\alpha$  и  $\beta$  - распада.

Основной закон радиоактивного распада:

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

где  $N_0$  – число нераспавшихся ядер в начальный ( $t=0$ ) момент времени,  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ,  $e$  – основание натуральных логарифмов,  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада.

Период полураспада:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Среднее время жизни радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Активность радиоактивного препарата:

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\lambda t},$$

где  $a_0 = \lambda N_0$  – активность препарата в начальный момент времени ( $t=0$ ).

Законы, выполняющиеся при ядерных реакциях:

а) закон сохранения числа нуклонов:

$$A_1 + A_2 + \dots = A_3 + A_4 + \dots,$$

б) закон сохранения заряда:

$$Z_1 + Z_2 + \dots = Z_3 + Z_4 + \dots,$$

где  $A_i$  и  $Z_i$  – соответственно массовые и зарядовые числа ядер.

Дефект массы ядра:

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

где  $Z$  – заряд ядра (число протонов в ядре),  $A$  – массовое число ядра (число нуклонов в ядре),  $(A - Z)$  – число нейтронов в ядре,  $m_p$  – масса протона,  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_{\text{я}}$  – масса ядра.

Энергия связи ядра:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2,$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра  $E_{св} = 931\Delta m$  МэВ.

Здесь  $\Delta m$  – дефект массы ядра, выраженный в а.е.м. (1 а.е.м.  $\sim 931$  МэВ).

### Примеры решения задач

**Пример 3.1.** Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, 0,58 мкм. Определить энергетическую светимость поверхности тела.

Дано:

$$\lambda_0 = 0,58 \text{ мкм} = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Найти:  $x_{1\min}$

#### Решение

Энергетическая светимость абсолютно черного тела:

$$R_s = \sigma T^4,$$

где  $T$  – абсолютная температура тела,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана

$$\left( \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right).$$

Температуру  $T$  можно связать с длиной волны  $\lambda_0$  законом Вина:

$$\lambda_0 = \frac{b}{T}, \text{ откуда } T = \frac{b}{\lambda_0},$$

где  $b$  – постоянная Вина ( $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ). Следовательно:

$$R_s = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_0} \right)^4.$$

Подставив числовые данные, получим:

$$R_s = 5,76 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 \text{ (Вт/м}^2\text{)} = 35,4 \text{ МВт/м}^2.$$

**Ответ:**  $R_s = 35,4 \text{ МВт/м}^2$ .

**Пример 3.2.** В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол  $\theta = 90^\circ$  (рис. 3.1). Энергия рассеянного фотона  $\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$ . Определить энергию фотона  $\varepsilon_1$  до рассеяния.

Дано:
$\varepsilon_2 = 0,4 \text{ МэВ}$
$\theta = 90^\circ$
Найти: $\lambda_0$

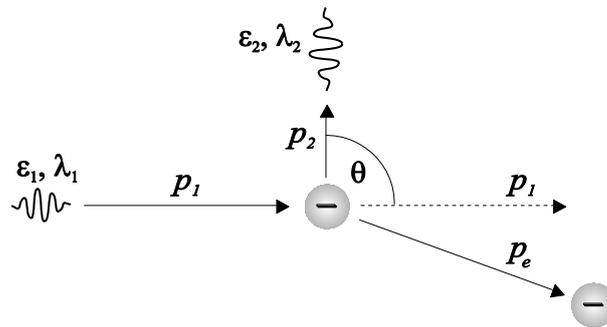


Рис. 3.1

### Решение

Изменение длины волны фотона, рассеянного на свободном электроне, определяется формулой Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (3.1.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабо связанным электроном,  $\lambda'$  – длина волны фотона, рассеянного на угол  $\theta$  после столкновения с электроном,  $m_0$  – масса покоящегося электрона.

Учитывая, что  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  и  $\varepsilon = h\nu$ , выразим длины волн  $\lambda$  и  $\lambda'$  через энергии  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  фотонов:

$$\frac{c}{\nu_2} - \frac{c}{\nu_1} = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad \text{или} \quad \frac{hc}{\varepsilon_2} - \frac{hc}{\varepsilon_1} = 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (3.1.2)$$

Из (3.1.2) следует, что

$$\frac{hc}{\varepsilon_1} = \frac{hc}{\varepsilon_2} - 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad \text{или} \quad \frac{c}{\varepsilon_1} = \frac{c}{\varepsilon_2} - \frac{2}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (3.1.3)$$

Выразим из полученной формулы искомую величину:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_2 m_0 c^2}{m_0 c^2 - 2\varepsilon_2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}. \quad (3.1.4)$$

Подставим числовые данные, учитывая при этом, что  
 $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{0,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 0,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2} = 2,96 \cdot 10^{-13}$$

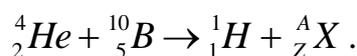
(Дж) = 1,85 МэВ.

**Ответ:**  $\varepsilon_1 = 1,85 \text{ МэВ}$ .

**Пример 3.3.** При соударении  $\alpha$ -частицы с ядром  ${}^{10}_5\text{B}$  произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось два новых ядра. Одним из этих ядер было ядро водорода  ${}^1_1\text{H}$ . Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, дать символическую запись ядерной реакции и определить ее энергетический баланс.

### Решение

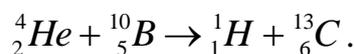
Обозначим неизвестное ядро символом  ${}^A_Z\text{X}$ . Так как  $\alpha$ -частица представляет собой ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$ , то запись реакции имеет вид:



Применяя законы сохранения числа нуклонов и заряда, получим уравнения:

$$4 + 10 = 1 + A \qquad 2 + 5 = 1 + Z.$$

Отсюда  $A = 13$  и  $Z = 6$ . Следовательно, неизвестное ядро является ядром атома изотопа углерода  ${}^{13}_6\text{C}$ . Теперь можно записать ядерную реакцию в окончательном виде:



Энергетический баланс ядерной реакции определим по формуле

$$Q = 931 \left[ (m_{\text{He}} + m_{\text{B}}) - (m_{\text{H}} + m_{\text{C}}) \right].$$

Здесь  $m_{\text{He}} + m_{\text{B}}$  — сумма масс исходных данных ядер,  $m_{\text{H}} + m_{\text{C}}$  — сумма масс продуктов реакции.

При расчетах по этой формуле массы ядер можно заменить массами ней-

тральных атомов. Это возможно по следующей причине: число электронов в электронной оболочке нейтрального атома равно его зарядовому числу  $Z$ . Сумма зарядовых чисел исходных ядер равна сумме зарядовых чисел продуктов реакции. Следовательно, электронные оболочки ядер гелия и бора содержат вместе столько же электронов, сколько их содержат электронные оболочки ядер углерода и водорода. Таким образом, при вычитании суммы масс нейтральных атомов углерода и водорода из суммы масс атомов гелия и бора массы электронов выпадут. Получим тот же результат, как если бы брали массы только ядер. Подставим массы атомов в формулу для  $Q$  и получим:

$$Q = 931[(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)] = 4,06 \text{ МэВ.}$$

Получили  $Q > 0$ , следовательно, энергетический баланс указанной ядерной реакции положителен, т.е. реакция проходит с выделением тепла.

#### 4. Задачи к контрольной работе №2

1. Два круговых витка с током, имеющим одинаковый радиус и общий центр, расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Магнитная индукция результирующего поля в центре витков равна  $2 \cdot 10^{-4}$  Тл. Магнитная индукция поля первого витка с током в этой же точке равна  $1,6 \cdot 10^{-4}$  Тл. Ток, текущий по первому витку равен 8А. Определить величину тока, протекающего во втором витке.

2. Круговой виток и прямолинейный бесконечно длинный проводник с током находятся в одной плоскости. Расстояние от прямолинейного проводника до центра витка равно  $l = 10$  см, радиус витка равен  $R = 6$  см, сила тока в витке равна  $I_1 = 13,4$  А, сила тока в проводнике составляет  $I_2 = 22$  А (рис. 4.1). Найти напряженность и индукцию магнитного поля в центре кругового витка, если и проводник, и виток находятся в воздухе ( $\mu = 1$ ).

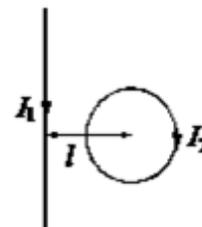


Рис. 4.1

3. Найти напряженность магнитного поля в центре кругового витка радиусом 6 см, образованного бесконечно длинным проводником, сила тока в котором равна 12 А (рис. 4.2).

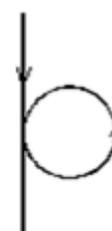


Рис. 4.2

4. По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток 3 А. Круговой виток, имеющий диаметр 30 см и ток 5 А, расположен так, что плоскость витка параллельна прямому проводнику. Отрезок, соединяющий центр витка и прямой проводник, перпендикулярен прямому проводнику и плоскости витка и равен 10 см. Найти магнитную индукцию в центре витка.

5. Три параллельных прямолинейных проводника большой длины расположены в воздухе на расстоянии  $a = 15$  см друг от друга. Сила тока во всех проводниках равна  $I = 12$  А, а направлены токи, как показано на рис. 4.3. Найти индукцию магнитного поля в точке О, расположенного в центре равностороннего треугольника.

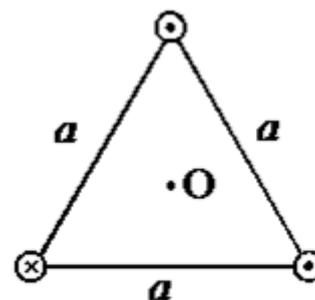


Рис. 4.3

6. По тонкому проводнику, изогнутому в виде шестиугольника со стороной  $a = 10$  см, идет ток  $I = 20$  А. Определить магнитную индукцию в центре шестиугольника.

7. Два прямых бесконечно длинных проводника расположены в параллельных плоскостях, а их проекции на одну плоскость перпендикулярны друг к другу. По ним протекают одинаковые токи по 5 А. Найти величину магнитной индукции в точке, находящейся на середине кратчайшего расстояния между проводниками, которое равно 20 см.

8. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены параллельно на расстоянии  $d = 15$  см друг от друга. По проводникам текут токи по 5 А в противоположных направлениях. Найти напряженность магнитного

поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1 = 20$  см от первого тока и расстоянии  $r_2 = 30$  см от второго проводника.

9. По медной проволочной рамке, имеющей форму правильного шестиугольника, течет ток  $I = 2$  А. При этом в центре рамки образуется магнитное поле напряженностью  $H = 33$  А/м. Определить падение напряжения на концах проволоки, из которой сделана рамка.

10. По двум бесконечно длинным параллельным проводникам текут токи в противоположных направлениях  $I_1 = 10$  А и  $I_2 = 15$  А. Расстояние между проводниками  $a = 10$  см. Определить величину и направление вектора магнитной индукции  $B$  в точке, удаленной от первого проводника на 8 см и на 6 см от второго проводника.

11. Плоский контур площадью  $S = 10$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле индукцией  $B = 0,02$  Тл. Определите магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, если плоскость его составляет угол  $\alpha = 70^\circ$  с направлением линий индукции.

12. Контур площадью  $S = 10^{-2}$  м<sup>2</sup> расположен перпендикулярно к линиям магнитной индукции. Магнитная индукция изменяется по закону  $B = (2 + 5t^2) \cdot 10^{-2}$  Тл. Установите закон изменения ЭДС индукции, возникающей в контуре.

13. Рамка, имеющая  $N = 10^3$  витков площадью  $S = 5$  см<sup>2</sup>, замкнута на гальванометр с сопротивлением  $R = 1$  кОм. Рамка находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 10^{-2}$  Тл, причем линии поля перпендикулярны к ее плоскости. Какой заряд  $q$  пройдет по цепи гальванометра, если направление магнитного поля изменить на обратное?

14. Рамка, содержащая  $N = 10$  витков площадью  $S = 5,0$  см<sup>2</sup>, присоединена к гальванометру и находится в магнитном поле, перпендикулярном плоскости рамки. При повороте рамки на  $180^\circ$  вокруг оси, лежащей в плоскости рамки, по цепи протекает заряд  $q = 30$  мкКл. Найти магнитную индукцию, если сопротивление цепи  $R = 60$  Ом.

15. Протон, движущийся со скоростью  $v = 2,5 \cdot 10^5$  м/с, влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 4$  мТл так, что его скорость составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с направлением поля. Найти расстояние, пройденное протоном за три витка.

16. Протон и  $\alpha$ -частица влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Сравнить радиусы окружностей, которые описывают частицы, если у них: а) одинаковые скорости; б) скорость протона в 4 раза выше скорости  $\alpha$ -частицы. Заряд  $\alpha$ -частицы в 2 раза больше заряда протона, а масса в 4 раза больше.

17. В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 10$  мТл перпендикулярно линиям индукции влетает частица, несущая один элементарный заряд. В поле частица начинает двигаться по окружности с частотой  $n = 18,3 \cdot 10^4$  об/с. Найти массу частицы.

18. Однородное электрическое поле с напряженностью  $E = 10^4$  В/м перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $B = 0,02$  Тл. Электрон влетает в эти поля перпендикулярно векторам  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ . При какой начальной скорости электрон будет двигаться прямолинейно?

19. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 10$  кВ, влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению его движения. Индукция магнитного поля  $\vec{B} = 1,19$  мТл. Найти радиус окружности, по которой движется электрон, период обращения и момент импульса электрона.

20. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 6$  кВ, влетает в однородное магнитное поле под углом  $\alpha = 30^\circ$  к направлению поля и движется по винтовой траектории. Индукция магнитного поля  $\vec{B} = 13$  мТл. Найти радиус и шаг винтовой траектории.

21. Физический маятник состоит из легкого стержня, на котором закреплены два одинаковых груза: один на расстоянии  $l_1 = 30$  см от оси вращения, другой — на расстоянии  $l_2 = 15$  см от оси вращения. Ось проходит через конец стержня перпендикулярно ему. Найти период колебаний такого маятника.

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

23. Определите период колебаний однородного стержня массой 2 кг и длиной 1 м, совершающего колебания вокруг горизонтальной оси, проходящей через точку, расположенную на расстоянии 25 см от его верхнего края.

24. Найти кинематическое уравнение гармонических колебаний точки, если максимальное ускорение  $a_{\max} = 50$  см/с<sup>2</sup>, период колебаний  $T = 2$  с и смещение в начальный момент времени  $x_0 = 5$  см.

25. Шарик, подвешенный на пружине, отвели из положения равновесия вертикально вниз на расстояние  $x = 4,0$  см и сообщили ему скорость  $v_0 = 1,0$  м/с, после чего шарик стал совершать гармонические колебания с частотой  $\omega_0 = 25$  рад/с. Найти амплитуду колебаний.

26. Найти амплитуду  $A$  и начальную фазу  $\varphi$  гармонического колебания, полученного от сложения одинаково направленных колебаний, заданных уравнениями  $x_1 = 0,03 \sin(3\pi t + \pi/2)$  м и  $x_2 = 0,06 \sin(3\pi t + \pi/4)$  м.

27. Точка участвует в двух колебаниях одинакового периода с одинаковыми начальными фазами. Амплитуды колебаний равны  $A_1 = 3$  см и  $A_2 = 4$  см. Найти амплитуду результирующего колебания, если колебания совершаются: а) в одном направлении; б) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

28. Математический маятник длиной  $l = 0,5$  м, выведенный из положения равновесия, отклонился при первом колебании на  $x_1 = 5$  см, а при втором (в ту же сторону) на  $x_2 = 4$  см. Найти время, в течение которого амплитуда

колебаний уменьшится в  $e$  раз.

29. Амплитуда колебаний математического маятника длиной 1 м за 10 мин уменьшилась в 2 раза. Определить логарифмический декремент затухания

30. Логарифмический декремент затухания маятника равен 0,2. Во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за пять полных колебаний маятника?

31. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки индуктивности. Определить частоту колебаний, возникающих в контуре, если максимальная сила тока в катушке 1,2 А, максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора 1200 В, энергия контура 1,1 мДж.

32. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C=888$  пФ и катушки индуктивности  $L=2$  мГн. На какую длину волны  $\lambda$  настроен контур?

33. Катушка с индуктивностью  $L=30$  мкГн присоединена к плоскому конденсатору с площадью пластин  $S=0,01$  м<sup>2</sup> и расстоянием между ними  $d=0,1$  мм. Найти диэлектрическую проницаемость среды  $\epsilon$ , заполняющей пространство между пластинами, если контур настроен на длину волны 750 м.

34. За один период колебаний разность потенциалов на обкладках конденсатора уменьшилась в 1,04 раза. Емкость конденсатора  $C=405$  нФ, сопротивление контура  $R=2$  Ом. Определить индуктивность контура.

35. Электрический заряд на обкладках конденсатора в колебательном контуре изменяется по закону  $q=10\cos 100\pi t$ , мкКл. Определите максимальную энергию магнитного поля  $W$  в катушке, если ее индуктивность  $L=0,5$  Гн.

36. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C=40$  мкФ и катушки, имеющей индуктивность  $L=0,1$  Гн и сопротивление  $R=4$  Ом. Сколько колебаний должно пройти в контуре, чтобы максимальное значение силы тока уменьшилось в 3 раза?

37. Колебательный контур имеет емкость  $C=1,1$  нФ и индуктивность  $L=5$  мГн. Логарифмический декремент затухания  $\Theta=0,005$ . За какое время вследствие затухания потеряется 99 % энергии контура?

38. Уравнение изменения со временем тока в колебательном контуре имеет вид  $I=-0,02\sin 400\pi t$  А. Индуктивность контура  $L=1$  Гн. Найти период  $T$  колебаний, емкость  $C$ , максимальную энергию  $W_{\text{маг}}$  магнитного поля и максимальную энергию  $W_{\text{эл}}$  электрического поля.

39. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C=100$  пФ, катушки индуктивности  $L=0,01$  Гн и резистора сопротивлением  $R=20$  Ом. Определить: а) период затухающих колебаний; б) через сколько полных колебаний амплитуда тока в контуре уменьшится в  $e$  раз.

40. Определить добротность  $Q$  колебательного контура, если собственная частота  $\omega_0$  колебательного контура отличается на 10% от частоты свободных затухающих колебаний.

41. В опыте Юнга расстояние между щелями 1 мм, а положение первой светлой полосы на экране 1,5 мм. Каково расстояние от щелей до экрана, если щели освещаются светом с длиной волны  $5 \cdot 10^{-7}$  м? Определить положение

третьей темной полосы на экране.

42. Угловое расстояние между соседними светлыми полосами в опыте Юнга  $5 \cdot 10^{-4}$  рад. Расстояние от щелей до экрана 3 м. На каком расстоянии от центра интерференционной картины находится третья светлая полоса?

43. На тонкий стеклянный клин падает нормально к его поверхности монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Определить угол между поверхностями клина, если расстояние между смежными интерференционными минимумами в отраженном свете 4 мм. Показатель преломления стекла 1,5.

44. На стеклянный клин падает нормально пучок света с длиной волны 582 нм. Угол клина  $20''$ . Какое число темных полос приходится на длину 1 см поверхности клина?

45. Для уменьшения коэффициента отражения света от оптических стекол их поверхность покрывают тонкой пленкой вещества с показателем преломления 1,22, меньшим, чем у стекла. При какой минимальной толщине пленки отражение света от стекла будет равно нулю? Длина волны света 500 мкм, угол падения лучей  $70^\circ$ .

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

47. Найти минимальную толщину пленки с показателем преломления 1,33, при которой свет с длиной волны 0,64 мкм испытывает максимальное отражение, а свет с длиной волны 0,4 мкм не отражается совсем. Угол падения света  $30^\circ$ .

48. Диаметры двух светлых колец Ньютона 4,0 и 4,8 мм. Порядковые номера колец не определялись, но известно, что между двумя измеренными кольцами расположено три светлых кольца. Кольца наблюдались в отраженном свете с длиной волны 500 нм. Найти радиус кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта.

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

50. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. Наблюдение ведется в проходящем свете. Расстояние между четвертым и двадцатым светлыми кольцами 4,7 мм. Найти расстояние между третьим и десятым светлыми кольцами Ньютона.

51. На узкую щель шириной 0,25 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 750 нм. Определить расстояние между первыми дифракционными минимумами, если расстояние от щели до экрана 1 м.

52. На щель падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,54 мкм. Определить ширину щели, если угол между максимумами первого и второго порядков равен  $25^\circ$ .

53. На щель шириной 0,1 мм падает нормально пучок параллельных лучей белого света (0,38-0,76 мкм). На экране, отстоящем на расстоянии 1 м, наблюдается дифракционная картина. Найти ширину дифракционного максимума второго порядка.

54. Какой должна быть толщина плоскопараллельной стеклянной пластинки ( $n = 1,55$ ), чтобы в отраженном свете максимум первого порядка для длины волны 0,65 мкм наблюдался под тем же углом, что и у дифракционной решетки с постоянной 1 мкм?

55. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. На какую линию в спектре третьего порядка накладывается красная линия гелия ( $\lambda = 670 \text{ нм}$ ) спектра второго порядка?

56. На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,54 мкм. Определить период решетки, если угол между максимумами первого и второго порядков равен  $15^\circ$ .

57. Постоянная дифракционной решетки в 4 раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол между первым и вторым дифракционными минимумами.

58. Какова должна быть постоянная дифракционной решетки, чтобы в первом порядке были разрешены линии спектра калия с длинами волн 404,4 нм и 404,7 нм? Ширина решетки 3 см.

59. Параллельный пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на грань кристалла с расстоянием между его атомными плоскостями 0,3 нм. Какова длина волны излучения, если при угле падения на грань кристалла в  $60^\circ$  наблюдается дифракционный максимум первого порядка?

60. Параллельный пучок рентгеновского излучения с длиной волны 245 пм падает на естественную грань монокристалла каменной соли. Определить расстояние между атомными плоскостями монокристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается при падении излучения на поверхность монокристалла под углом  $29^\circ$ .

61. Падающий на поверхность жидкости луч, составляет с ней угол  $40^\circ$ . Отраженный луч максимально поляризован. Определить угол преломления луча.

62. Отраженный от стекла луч будет полностью поляризован при угле преломления  $30^\circ$ . Найти показатель преломления стекла.

63. Луч света переходит из воды ( $n_1 = 1,33$ ) в стекло ( $n_2 = 1,5$ ) так, что луч, отраженный от границы раздела этих сред, оказывается максимально поляризованным. Определить угол между падающим и преломленным лучами.

64. В дно пруда вбита свая высотой  $H = 6 \text{ м}$ , выступающая из воды на 1,5 м. Найти длину тени сваи на дне пруда, если лучи Солнца падают на поверхность воды под углом  $30^\circ$ . Показатель преломления воды  $n = 1,33$ .

65. Пучок естественного света последовательно проходит через два

поляризатора (две призмы Николя), плоскости пропускания которых образуют между собой угол  $40^\circ$ . Принимая, что коэффициент поглощения каждого поляризатора равен 0,15, найти, во сколько раз пучок света, выходящий из второго поляризатора, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый поляризатор.

66. Угол между плоскостями пропускания поляроидов равен  $30^\circ$ . Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в 4 раза. Пренебрегая потерей света при отражении, определить коэффициент поглощения света в поляроидах.

67. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества  $45^\circ$ . Найти для этого вещества угол полной поляризации.

68. Определить предельный угол полного внутреннего отражения света от диэлектрика, для которого угол Брюстера при падении света из воздуха равен  $57^\circ$ .

69. При прохождении слоя вещества интенсивность света уменьшилась в 9 раз. Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении пути, равного половине толщины этого слоя?

70. Интенсивность света, прошедшего через некоторую пластину толщиной 0,5 см, составила 82% от начальной интенсивности. Какая доля интенсивности пройдет через пластину из этого же вещества, если ее толщину увеличить в 2 раза?

71. Определить температуру и энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны 400 нм.

72. Принимая спектр Солнца за спектр излучения абсолютно черного тела, определить мощность суммарного (интегрального, т.е. приходящегося на все длины волн) излучения, если максимум испускательной способности соответствует длине волны 0,48 мкм. Радиус Солнца  $6,5 \cdot 10^5$  км.

73. Температура абсолютно черного тела при охлаждении понизилась с 1000 до 850 К. Определить, как и на сколько при этом изменилась длина волны, отвечающая максимуму распределения энергии.

74. Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела  $4,16 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>3</sup>. На какую длину волны оно приходится?

75. Определить количество теплоты, теряемое поверхностью расплавленной платины при  $1770^\circ\text{C}$  за 1 мин, если площадь поверхности 100 см<sup>2</sup>. Коэффициент поглощения принять равным 0,8.

76. Абсолютно черное тело имеет температуру 2900 К. В результате остывания тела длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, изменилась на 9 мкм. До какой температуры охладилось тело?

77. Мощность излучения абсолютно черного тела равна 10 кВт. Найти площадь излучающей поверхности тела, если максимум спектральной плотности его энергетической светимости приходится на длину волны 700 нм.

78. Температуру черного тела подняли с 500 К до 2500 К. Определить во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость. Как изменилась длина

волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости?

79. На сколько процентов увеличится энергетическая светимость абсолютно черного тела, если температура увеличится на 1%?

80. Мощность излучения раскаленной металлической поверхности равна 0,67 кВт. Температура поверхности 2500 К, ее площадь  $10 \text{ см}^2$ . Какую мощность излучения имела бы эта поверхность, если бы она была абсолютно черной? Найти отношение энергетических светимостей этой поверхности и абсолютно черного тела при данной температуре.

81. Красная граница фотоэффекта для цинка 310 нм. Определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падает свет с длиной волны 200 нм.

82. На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны 200 нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, что бы прекратить фототок. Работа выхода электрона для лития  $A = 2,7 \text{ эВ}$ .

83. Определить максимальную скорость электронов, вылетающих из металла под действием  $\gamma$  - лучей с длиной волны  $3 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ .

84. Какова должна быть длина волны ультрафиолетовых лучей, падающих на поверхность некоторого металла, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна  $9 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ ?

85. Поток монохроматического излучения с длиной волны 500 нм падает нормально на зеркальную (абсолютно отражающую) поверхность и давит на нее с силой  $10^{-8} \text{ Н}$ . Определить число фотонов, ежесекундно падающих на эту поверхность.

86. Пучок параллельных лучей монохроматического света падает нормально на плоскую зеркальную поверхность. Поток излучения 0,6 Вт. Определить силу давления, испытываемую этой поверхностью.

87. Световой поток мощностью 9 Вт нормально падает на поверхность площадью  $10 \text{ см}^2$ , коэффициент отражения которой  $\rho = 0,8$ . Какое давление испытывает при этом данная поверхность?

88. Фотон рентгеновских лучей с частотой  $1,5 \cdot 10^{18} \text{ Гц}$ , при комптоновском столкновении с электроном потерял 10 % своей энергии. Каковы его энергия и длина волны до и после столкновения с электроном?

89. Определить импульс электрона отдачи при эффекте Комптона, если фотон с энергией, равной энергии покоя электрона, был рассеян на угол равный  $180^\circ$ .

90. Фотон с энергией 0,15 МэВ рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего его длина волны изменилась на  $\Delta\lambda = 3 \text{ пм}$ . Найти угол, под которым вылетел комптоновский электрон.

91. Протон обладает кинетической энергией 1 кэВ. Определить дополнительную энергию, которую нужно ему сообщить для того, чтобы длина волны де Бройля уменьшилась в три раза.

92. Электрон обладает кинетической энергией 1,02 МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия электрона уменьшится вдвое?

93. Вычислить отношение кинетической энергии электрона к кинетической энергии протона с одинаковой длиной волны де Бройля. Скорости существенно меньше, чем скорости света.

94. Атом испустил фотон с длиной волны 0,55 мкм. Продолжительность излучения 10 нс. Определить наибольшую погрешность, с которой может быть измерена длина волны излучения.

95. Частица в потенциальном ящике находится в основном (невозбужденном) состоянии. Какова вероятность обнаружить частицу в крайней трети ящика?

96. Найти период полураспада радиоактивного изотопа, если его активность за время 10 суток уменьшилась на 24 % по сравнению с первоначальной.

97. Определить массу радиоактивного изотопа магния  ${}^{27}_{12}\text{Mg}$ , если его активность 139 Ки. Период полураспада этого изотопа 10 минут.

98. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для элемента  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ .

99. Найти энергию ядерной реакции:  ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ .

100. Найти энергию ядерной реакции:  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$ .

### Фундаментальные физические постоянные

Постоянная	Значение
Ускорение свободного падения на Земле	$g = 9,8 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Число Авогадро	$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Заряд электрона	$e = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,10 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т. И. Курс физики : Учеб. пособие / Т. И. Трофимова - 24-е изд., стереотип. - М. : Академия, 2020. - 560 с.
2. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн - СПб. : Книжный мир, 2005. - 328 с.
3. Чертов А. Г. Задачник по физике : Учеб. пособие / А. Г. Чертов - 8-е изд., доп. и перераб. - М. : Физматлит, 2009.
4. Дмитриева Т. Ф. Основы физики: учеб. пособие для вузов / Т. Ф. Дмитриева, В. Л. Прокофьев. - М.: Академия, 2013. – 448 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Законы и формулы к решению задач по теме «Электромагнетизм» ....	4
2. Законы и формулы к выполнению задач по теме «Колебания и волны»....	11
3. Законы и формулы к выполнению задач по теме «Квантовая природа излучения. Элементы квантовой механики и ядерной физики» .....	20
4. Задачи к контрольной работе №2 .....	27
Библиографический список .....	36

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.  
КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ.  
ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению контрольной работы №2 по физике  
для студентов всех специальностей  
заочной формы обучения

**Составители:**

**Золототрубов Дмитрий Юрьевич,  
Татьянина Елена Павловна,  
Никишина Анна Игоревна,  
Санников Владимир Геннадьевич,  
Тутов Евгений Анатольевич**

Подписано к изданию 25.11.2022.  
Уч.-изд. л. 2,0.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84