# Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Оптика. Элементы квантовой механики, атомной и ядерной физики

*Методические указания и контрольные задания по физике для студентов всех специальностей факультета дистанционного обучения (часть II)*

Воронеж 2011

УДК 53.07
ББК 22.3

*Составители* А.К. Тарханов, А.И. Никишина, Ю.С. Золототрубов

**Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Оптика. Элементы квантовой механики, атомной и ядерной физики:** метод. указания к изучению курса физики для студ. факультета дистанционного обучения (часть II) / Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т.; сост.: А.К. Тарханов, А.И. Никишина, Ю.С. Золототрубов. – Воронеж, 2011. – 32 с.

Приведены условия задач для выполнения контрольных работ с разбивкой по вариантам, содержатся краткий теоретический материал и примеры решения задач по темам «Электричество и магнетизм», «Колебания и волны», «Оптика», «Элементы квантовой механики, атомной и ядерной физики».

Данные методические указания предназначены для студентов всех специальностей факультета дистанционного обучения.

Ил. 4. Библиогр.: 7 назв.

УДК 53.07
ББК 22.3

*Печатается по решению редакционно-издательского совета*

*Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.*

***Рецензент*** *– Нечаев В.Н., док. физ.-мат. наук, проф. Кафедры ВМФММ Воронежского государственного технического университета*

# ТЕМА №3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

## Законы и формулы к выполнению задач по теме №3

1. Закон Кулона:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q_1Q_2}{\varepsilon r^2}, \qquad (3.1)$$

где $F$ – сила взаимодействия точечных зарядов $Q_1$ и $Q_2$; $r$ – расстояние между зарядами; $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_0$ – электрическая постоянная.

2. Напряженность электрического поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \qquad (3.2)$$

3. Потенциал электрического поля:

$$\varphi = \frac{\Pi}{Q}, \qquad (3.3)$$

где $\Pi$ – потенциальная энергия точечного положительного заряда $Q$, находящегося в данной точке поля (при условии, что потенциальная энергия заряда, удаленного в бесконечность, равна нулю).

4. Напряженность и потенциал поля, создаваемого системой точечных зарядов (принцип суперпозиции электрических полей):

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{N}\vec{E}_i; \quad \varphi = \sum_{i=1}^{N}\varphi_i, \qquad (3.4)$$

где $\vec{E_i}$, $\varphi_i$ – напряженность и потенциал в данной точке поля, создаваемого $i$-м зарядом.

5. Напряженность и потенциал поля, создаваемого точечным зарядом:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}; \varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}, \qquad (3.5)$$

где $r$ – расстояние от заряда $Q$ до точки, в которой определяются напряженность и потенциал.

6. Напряженность и потенциал поля, создаваемого проводящей заряженной сферой радиуса $R$ на расстоянии $r$ от центра сферы (заряд сферы $Q$):

- если $r<R$, то $E=0$; $\quad \varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{\varepsilon R}$; (3.6)
- если $r=R$, то $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{\varepsilon R^2}$; $\quad \varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{\varepsilon R}$; (3.7)
- если $r>R$, то $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{\varepsilon r^2}$; $\quad \varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q}{\varepsilon r}$. (3.8)

7. Линейная плотность заряда (заряд, приходящийся на единицу длины заряженного тела):

$$\tau = \frac{Q}{l}. \qquad (3.9)$$

8. Поверхностная плотность заряда (заряд, приходящийся на единицу площади поверхности заряженного тела):

$$\sigma = \frac{Q}{S}. \qquad (3.10)$$

9. Напряженность и потенциал поля, создаваемого распределенными зарядами. Если заряд равномерно распределен вдоль линии с линейной плотностью $\tau$, то на линии выделяется малый участок длины $dl$ с зарядом $dQ=\tau dl$. Такой заряд можно рассматривать как точечный. Напряженность $dE$ и потенциал $d\varphi$ электрического поля, создаваемого зарядом $dQ$, определяется формулами:

$$\vec{E} = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}\frac{\vec{r}}{r}; \varphi = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r}, \qquad (3.11)$$

где $r$ – радиус-вектор, направленный от выделенного элемента $dl$ к точке, в которой вычисляется напряженность.

Используя принцип суперпозиции электрических полей, находим интегрированием напряженность $\vec{E}$ и потенциал $\varphi$ поля, создаваемого распределенным зарядом:

$$\vec{E} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon}\int_l \frac{dl}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}; \varphi = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon}\int_l \frac{dl}{r}. \qquad (3.12)$$

Интегрирование ведется вдоль всей длины $l$ заряженной линии.

10. Напряженность поля, создаваемого бесконечной прямой равномерно заряженной линией или бесконечно длинным цилиндром:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon r}, \qquad (3.13)$$

где $r$ – расстояние от нити или оси цилиндра до точки, напряженность поля в которой вычисляется.

11. Напряженность поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0 \varepsilon}. \qquad (3.14)$$

12. Связь потенциала с напряженностью:

а) в случае однородного поля

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}; \qquad (3.15)$$

b) в случае поля, обладающего центральной или осевой симметрией:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}. \qquad (3.16)$$



13. Работа сил поля по перемещению заряда $Q$ из точки поля с потенциалом $\varphi_1$ в точку с потенциалом $\varphi_2$:

$$A_{12} = Q(\varphi_1 - \varphi_2). \qquad (3.17)$$

14. Электроемкость:

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad \text{или} \quad C = \frac{Q}{U}, \qquad (3.18)$$

где $\varphi$ – потенциал проводника (при условии, что в бесконечности потенциал проводника принимается равным нулю); $U$ – разность потенциалов пластин конденсатора.

15. Электроемкость плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d}, \qquad (3.19)$$

где $S$ – площадь пластины (одной) конденсатора; $d$ – расстояние между пластинами.

16. Электроемкость батареи конденсаторов:

- а) при последовательном соединении: $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{C_i}$; (3.20)
- б) при параллельном соединение: $C = \sum_{i=1}^{N} C_i$, (3.21)

где $N$ – число конденсаторов в батарее.

17. Энергия заряженного конденсатора:

$$W = \frac{QU}{2}; W = \frac{CU^2}{2}; W = \frac{Q^2}{2C}. \qquad (3.22)$$

*Постоянный ток*

18. Сила тока:

$$I = \frac{Q}{t}, \qquad (3.23)$$

где $Q$ – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время $t$.

19. Закон Ома:

а) для участка цепи, не содержащего ЭДС, $I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R} = \frac{U}{R}$, (3.24)

где $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – разность потенциалов (напряжение) на концах участка цепи; $R$ – сопротивление участка;

б) для участка цепи, содержащего ЭДС, $I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon}{r + R}$, (3.25)

где $\varepsilon$ – ЭДС источника тока; $R$ – полное сопротивление участка (сумма внешних и внутренних сопротивлений);

в) для замкнутой (полной) цепи $I = \frac{\varepsilon}{r + R}$, (3.26)

где $r$ – внутреннее сопротивление цепи; $R$ – внешнее сопротивление цепи.

20. Сопротивление $R$ и проводимость $G$ проводника:

$$R = \rho\frac{l}{S}; \quad G = \sigma\frac{S}{l}, \tag{3.27}$$

где $\rho$ – удельное сопротивление; $\sigma$ – удельная проводимость; $l$ – длина проводника; $S$ – площадь поперечного сечения проводника.

21. Сопротивление системы проводников:

- при последовательном соединении $R = \sum_{i=1}^{N} R_i$; (3.28)
- при параллельном соединении $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{R_i}$, (3.29)

где $R_i$ – сопротивление $i$-го проводника.

22. Работа тока:

$$A = IUt; \quad A = I^2Rt; \quad A = \frac{U^2}{R}t. \tag{3.30}$$

Первая формула справедлива для любого участка цепи, на концах которого поддерживается напряжение $U$, последние две – для участка, не содержащего ЭДС.

23. Мощность тока:

$$P = IU; P = I^2R; P = \frac{U^2}{R}. \tag{3.31}$$

24. Закон Джоуля- Ленца:

$$Q = I^2Rt. \tag{3.32}$$

*Электромагнетизм*

25. Связь магнитной индукции $\vec{B}$ с напряженностью $\vec{H}$ магнитного поля:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \tag{3.33}$$

где $\mu$ – магнитная проницаемость изотропной среды; $\mu_0$ – магнитная постоянная.

26. Сила Ампера:

$$\overrightarrow{dF} = I\left[\overrightarrow{dl}\,\vec{B}\right] \text{ или } dF = IBdl\sin\alpha, \tag{3.34}$$

где $\alpha$ – угол между векторами $\overrightarrow{dl}$ и $\vec{B}$.

27. Магнитный поток:

$$\Phi = BS\cos\alpha \quad \text{или} \quad \Phi = B_nS \tag{3.35}$$

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

28. Момент сил, вращающих контур с током в магнитном поле:

$$M = p_mB\sin\varphi. \tag{3.36}$$

Здесь $p_m$ – магнитный момент контура с током.

29. Магнитный момент контура с током:

$$p_m = ISN, \tag{3.37}$$



где $S$ – площадь контура, $N$ – число витков.

30. ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{3.38}$$

31. Разность потенциалов на концах проводника, движущегося со скоростью $\vec{\upsilon}$ в магнитном поле:

$$U = Bl\upsilon\sin\alpha, \tag{3.39}$$

где $l$ – длина проводника; $\alpha$ – угол между векторами $\vec{\upsilon}$ и $\vec{B}$.

32. ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}. \tag{3.40}$$

33. Индуктивность соленоида:

$$L = \mu\mu_0n^2V, \tag{3.41}$$

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

34. Энергия магнитного поля:

$$W = \frac{LI^2}{2}. \tag{3.42}$$

35. Объемная плотность энергии магнитного поля (энергия в единице объема):

$$w = \frac{1}{2}BH \quad \text{или} \quad w = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu\mu_0}, \quad \text{или} \quad w = \frac{1}{2}\mu\mu_0H^2, \tag{3.43}$$

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

**Примеры решения задач по теме №3**

***Пример 3.1.*** На пластинах плоского конденсатора находится заряд *10 нКл*. Площадь каждой пластины конденсатора равна *100 см²*, диэлектрик – воздух. Определить силу, с которой притягиваются пластины. Поле между пластинами считать однородным.

*Дано:* $Q = 10$ *нКл* $= 10\cdot10^{-9}$ *Кл*,
$S = 100$ *см²* $= 100\cdot10^{-4}$ *м²*,
$\varepsilon = 1$.

*Найти: F.*

*Решение*

Заряд $Q$ одной пластины находится в поле напряженностью $E_1$, созданном зарядом другой пластины конденсатора. Следовательно, на первый заряд действует сила:

$$F = QE_1. \tag{3.1.1}$$

Так как:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{Q}{2\varepsilon_0S}, \tag{3.1.2}$$

где $\sigma$ – поверхностная плотность заряда пластины, то формула (3.1.1) с учетом выражения (3.1.2) примет вид:

$$F = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 S}. \quad (3.1.3)$$

Подставив числовые данные в (3.1.3), получим:

$$F = \frac{(10 \cdot 10^{-9}\ Кл)^2}{2 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \dfrac{Ф}{м} \cdot 100 \cdot 10^{-4}\ м^2} = 5{,}65 \cdot 10^{-4} = 565\ мкН.$$

*Ответ:* Сила, с которой притягиваются пластины $F$=565мкН.

***Пример 3.2.*** Плоский квадратный контур со стороной *10 см*, по которому течет ток *100 А*, свободно установился в однородном магнитном поле *1 Тл*. Определить работу, совершаемую внешними силами при повороте контура относительно оси, проходящей через середину его противоположных сторон, на угол: 1) $90^0$; 2) $3^0$. При повороте контура сила тока в нем поддерживается неизменной.

*Дано:* $a = 10\ см = 10 \cdot 10^{-2}\ м$,
$I=100\ А$,
$B=1\ Тл$,
$\varphi_1 = 90^0$,
$\varphi_2 = 3^0$,
*Найти:* $A_1$, $A_2$.

*Решение*

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

$$M = p_m B \sin\varphi. \quad (3.2.1)$$

Здесь $p_m$ – магнитный момент контура с током, $B$ – магнитная индукция поля, $\varphi$ – угол поворота контура. 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 $\overrightarrow{p_m}$ и $\vec{B}$ совпадают по направлению. Если внешние силы выведут контур из положения равновесия, то возникший момент сил, определяемый формулой (3.2.1), 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:

$$dA = M d\varphi. \quad (3.2.2)$$

Подставив в (3.2.2) выражение (3.2.1) и учитывая, что $p_m = IS = Ia^2$, где $I$ – сила тока в контуре; $S=a^2$ – площадь контура, получим:

$$dA = IBa^2 \sin\varphi d\varphi. \quad (3.2.3)$$

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

$$A = IBa^2 \int_0^{\varphi} \sin\varphi d\varphi. \quad (3.2.4)$$



1) Работа при повороте на угол $\varphi_1 = 90^0$:

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin\varphi d\varphi = IBa^2(-\cos\varphi)\Big|_0^{\pi/2} = IBa^2. \quad (3.2.5)$$

Подставим числовые данные и вычислим работу:

$$A_1 = 100 \cdot 1 \cdot (10 \cdot 10^{-2})^2 = 1\ Дж.$$

2) Работа при повороте на угол $\varphi_2 = 3^0$. В этом случае, учитывая, что угол $\varphi_2$ мал, заменим в выражении (4) $\sin\varphi \approx \varphi$:

$$A_2 = IBa^2 \int_0^{\varphi_2} \varphi d\varphi = \frac{1}{2} IBa^2 \varphi_2^2. \quad (3.2.6)$$

Выразим угол $\varphi_2$ в радианах. После подстановки числовых значений величин в (3.2.6) найдем:

$$A_2 = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 1 \cdot (10 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0{,}0523^2 = 1{,}37\ мДж.$$

*Ответ:* $A_1$=*1 Дж*, $A_2$=*1,37мДж*.

### Задачи по теме №3

1. Электрическое поле создается двумя бесконечными параллельными плоскостями, заряженными равномерно разноименными зарядами с поверхностной плотностью $\sigma_1$=1 нКл/м$^2$ и $\sigma_2$=2 нКл/м$^2$. Определите напряженность электростатического поля: 1) между плоскостями; 2) за пределами плоскостей. Постройте график изменения напряженности поля вдоль линии, перпендикулярной плоскостям.
2. Две параллельные плоскости, заряженные с поверхностными плотностями $\sigma_1$=2 мкКл/м$^2$ и $\sigma_2$=-0,8 мкКл/м$^2$, находятся на расстоянии 0,6 см друг от друга. Определить разность потенциалов между плоскостями.
3. Поле образовано бесконечной равномерно заряженной плоскостью с поверхностной плотностью заряда 40 нКл/м$^2$. Определить разность потенциалов двух точек поля, отстоящих на $r_1$=15 см и $r_2$=20 см.
4. Заряд равномерно распределен по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью 10 нКл/м$^2$. Определить разность потенциалов двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от нее на расстояние 10 см.
5. Определить заряд в плоском конденсаторе емкостью 0,02 мкФ, если напряженность поля в конденсаторе составляет 320 В/см, а расстояние между пластинами 0,5 см.
6. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено стеклом ($\varepsilon$=7). Расстояние между пластинами 5 мм, разность потенциалов 1 кВ. Определите: 1) напряженность поля в стекле; 2) поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора.

7. Определите расстояние между пластинами плоского конденсатора, если между ними приложена разность потенциалов 150 В. Площадь каждой пластины 100 см$^2$, ее заряд 10 нКл. Диэлектриком служит слюда ($\varepsilon$=7).
8. Плоский конденсатор с площадью пластин 300 см$^2$ каждая заряжен до разности потенциалов 1 кВ. Расстояние между пластинами 4 см. Диэлектрик – стекло. Определить энергию поля конденсатора и плотность энергии поля.
9. К батарее с ЭДС 300 В подключены два плоских конденсатора емкостью $C_1$=2 пФ и $C_2$=3 пФ. Определить заряд и напряжение на пластинах конденсатора в двух случаях: 1) при последовательном соединении; 2) при параллельном соединении.
10. Плоский воздушный конденсатор, расстояние между пластинами которого 2 см, заряжен до потенциала 3000 В. Какова будет напряженность поля конденсатора, если, не отключая источника напряжения, пластины раздвинуть на расстояние 5 см? Вычислить энергию конденсатора до и после раздвижения пластин. Площадь пластин 100 см$^2$.
11. При включении в электрическую цепь проводника, имеющего диаметр 0,5 мм и длину 47 мм, напряжение на нем 1,2 В при токе в цепи 1 А. Найти удельное сопротивление материала проводника.
12. При ремонте электрической плитки спираль была укорочена на 10% от первоначальной длины. Во сколько раз изменилась мощность плитки?
13. ЭДС батареи равна 240 В, сопротивление батареи 1 Ом, внешнее сопротивление равно 23 Ом. Определить общую мощность, полезную мощность и КПД батареи.
14. Лампочка и реостат, соединенные последовательно, присоединены к источнику тока. Напряжение на зажимах лампочки равно 40 В, сопротивление реостата равно 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность 120 Вт. Найти силу электрического тока в цепи.
15. ЭДС батареи равно 20 В, сила тока 4 А. Сопротивление внешней цепи равно 2 Ом. Найти КПД батареи. При каком значении внешнего сопротивления КПД будет равен 99%?
16. На сколько равных частей нужно разрезать проводник сопротивлением 64 Ом, чтобы, соединив эти части параллельно, получить сопротивление 1 Ом?
17. Прямой провод длиной 10 см, по которому течет ток силой 20 А, находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,01 Тл. Найти угол между направлением вектора магнитной индукции и током, если на провод действует сила 10 мН.
18. Прямой проводник длиной 20 см, по которому течет ток 50 А, движется в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл. Какую работу совершат силы, действующие на проводник со стороны поля, переместив его на 10 см, если направление перемещения перпендикулярно линиям индукции и длине проводника?
19. В однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл движется равномерно проводник длиной 10 см. По проводнику течет ток 2 А. Скорость движения проводника 20 см/с и направлена перпендикулярно к направлению магнитного поля. Найти работу по перемещению проводника за время 10 с.



20. Виток, радиус которого 4 см, находится в однородном магнитном поле напряженностью 150 А/м. Плоскость витка перпендикулярна линиям индукции поля. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть виток около его диаметра на угол 60$^0$ при токе в витке 10 А?
21. Прямоугольная рамка с током расположена в магнитном поле параллельно линиям индукции и испытывает со стороны поля вращающий момент 50 мН·м. Вычислить работу сил поля при повороте рамки на угол 60$^0$.
22. Прямой провод длиной 20 см с током 5 А, находящийся в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите работу сил поля, под действием которых проводник переместился на 2 см.
23. Квадратный проводящий контур со стороной 20 см и током 10 А свободно подвешен в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл. Определите работу, которую необходимо совершить, чтобы повернуть контур на 180$^0$ вокруг оси, перпендикулярной направлению магнитного поля.
24. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,2 Тл находится квадратный проводящий контур со стороной 20 см и током 10 А. Плоскость квадрата составляет с направлением поля угол в 30$^0$. Определите работу удаления контура за пределы поля.
25. Виток, радиус которого 4 см, находится в однородном магнитном поле напряженностью 150 А/м. Плоскость витка перпендикулярна линиям индукции поля. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть виток около его диаметра на угол 60$^0$ при токе в витке 10 А?
26. Виток радиусом 10 см, по которому течет ток силой 20 А, свободно установился в однородном магнитном поле напряженностью 10$^3$ А/м. Виток повернули относительно диаметра на угол 60$^0$. Определить совершенную при этом работу.
27. Найти магнитный поток, создаваемый соленоидом сечением 10 см$^2$, если он имеет 10 витков на каждый сантиметр его длины при силе тока 20 А.
28. На длинный картонный каркас диаметром 2 см уложена однослойная обмотка (виток к витку) из проволоки диаметром 0,5 мм. Определить магнитный поток, создаваемый таким соленоидом при силе тока 4 А.
29. Плоский контур площадью 10 см$^2$ находится в однородном магнитном поле индукцией 0,02 Тл. Определить магнитный поток, пронизывающий контур, если плоскость его составляет угол 70$^0$ с направлением линий индукции.
30. Соленоид содержит 4000 витков провода, по которому течет ток 20 А. Определить магнитный поток, если индуктивность 0,4 Гн.
31. Соленоид диаметром 4 см, имеющий 500 витков, помещен в магнитное поле, индукция которого изменяется со скоростью 1 мТл/с. Ось соленоида составляет с вектором магнитной индукции угол 45$^0$. Определите ЭДС индукции, возникающую в соленоиде.

32. В магнитном поле, изменяющееся по закону: $B = B_0 \cos \omega t$ ($B_0$ =0,1 Тл, $\omega$=4 $c^{-1}$), помещена квадратная рамка со стороной 50 см, причем нормаль к рамке образует с направлением поля угол $45^0$. Определите ЭДС индукции, возникающую в рамке в момент времени 5 с.
33. Плоский виток площади 10 см$^2$ помещен в однородное магнитное поле перпендикулярно к линиям индукции. Сопротивление витка 1 Ом. Какой ток протечет по витку, если магнитная индукция поля будет убывать со скоростью $B/t$=0,01 Тл/с?
34. Какова индуктивность катушки с железным сердечником, если за время 0,5 с ток в цепи изменился от $I_1$=10 А до $I_2$=5 А, а возникшая при этом ЭДС самоиндукции 25 В?
35. Катушка диаметром 10 см, имеющая 500 витков, находится в магнитном поле. Чему будет равно среднее значение ЭДС индукции в этой катушке, если индукция магнитного поля увеличивается в течение 0,1 с от 0 до 2 Тл?
36. В однородном магнитном поле, индукция которого 0,8 Тл, равномерно вращается рамка с угловой скоростью 15 рад/с. Площадь рамки 150 см$^2$. Ось вращения находится в плоскости рамки и составляет $30^0$ с направлением силовых линий магнитного поля. Найти максимальную ЭДС индукции во вращающейся рамке.
37. В магнитном поле, индукция которого равна 0,05 Тл, помещена катушка, состоящая из 200 витков проволоки. Сопротивление катушки 40 Ом, площадь ее поперечного сечения 12 см$^2$. Катушка помещена так, что ее ось составляет $60^0$ с направлением поля. Какое количество электричества пройдет по катушке при исчезновении магнитного поля?
38. Две катушки намотаны на один общий сердечник. Индуктивность первой катушки 0,2 Гн, второй – 0,8 Гн, сопротивление второй катушки 600 Ом. Какой ток потечет по второй катушке, если ток в 0,3 А, текущий в первой катушке, выключить в течение 1 мс?
39. В однородном магнитном поле с индукцией 0,02 Тл равномерно вращается вокруг вертикальной оси горизонтальный стержень длиной 0,5 м. Ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям магнитной индукции. Определите число оборотов в секунду, при котором на концах стержня возникает разность потенциалов 0,1 В.
40. Обмотка соленоида содержит 10 витков на каждый сантиметр длины. При какой силе тока объемная плотность энергии магнитного поля будет равной 1 Дж/м$^3$?
41. Соленоид, площадь сечения которого 5 см$^2$, содержит 1200 витков. Индукция магнитного поля внутри соленоида при токе силой 2 А равна 0,01 Тл. Определить индуктивность соленоида.
42. Сколько витков проволоки диаметром 0,4 мм с изоляцией ничтожной толщины нужно намотать на картонный цилиндр диаметром 2 см, чтобы получить однослойную катушку с индуктивностью 1 мкГн? Витки вплотную прилегают друг к другу.



43. Сколько витков имеет катушка, индуктивность которой 1 мГн, если при силе тока 1 А магнитный поток сквозь катушку равен 2 мкВб?
44. На картонный каркас длиной 50 см и площадью сечения 4 см$^2$ намотан в один слой провод диаметром 0,2 мм так, что витки плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции пренебречь). Определить индуктивность получившегося соленоида.
45. Замкнутый соленоид с железным сердечником сечением 10 см$^2$ и длиной 20 см имеет 1000 витков. При токе 0,6 А относительная магнитная проницаемость сердечника равна 400. Определить при этих условиях магнитный поток и объемную плотность энергии в сердечнике.
46. Индуктивность соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас, равна 0,2 мГн. Длина соленоида 0,5 м, диаметр 1 см. Определить число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.
47. Две катушки намотаны на один сердечник. Определите их взаимную индуктивность, если при скорости изменения силы тока в первой катушке $dI_1/dt$=3 А/с, во второй катушке индуцируется ЭДС $\varepsilon_{12}$=0,3 В.
48. Две катушки намотаны на один сердечник. Индуктивность первой катушки $L_1$=0,12 Гн, второй – $L_2$=3 Гн. Сопротивление второй катушки 300 Ом. Определите силу тока во второй катушке, если за 0,01 с сила тока в первой катушке уменьшилась от 0,5 А до нуля.

## ТЕМА №4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

### Законы и формулы к выполнению задач по теме №4

1. Уравнение гармонических колебаний:

$$x = A \sin(\omega \cdot t + \varphi), \tag{4.1}$$

где $x$ – значение изменяющейся физической величины в момент времени $t$, $A$ – амплитуда колебания, $(\omega \cdot t + \varphi)$ – полная фаза колебания, $\varphi$ – начальная фаза, $\omega$ – собственная круговая частота колебания.

2. Скорость при гармонических колебаниях:

$$\upsilon = A\omega \cos(\omega \cdot t + \varphi). \tag{4.2}$$

3. Ускорение при гармонических колебаниях:

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega \cdot t + \varphi). \tag{4.3}$$

4. Собственная круговая частота колебания связана:

- с периодом колебаний $T$ соотношением: $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$; (4.4)
- с линейной частотой $\nu$ соотношением: $\omega = 2\pi\nu$. (4.5)

5. Сила, под действием которой точка массой $m$ совершает гармоническое колебание:

$$F = ma = -mA\omega^2 \sin(\omega \cdot t + \varphi). \qquad (4.6)$$

6. Кинетическая и потенциальная энергии колеблющейся точки:

$$E_K = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{2\pi^2 m}{T^2} A^2 \cos^2(\omega \cdot t + \varphi); \qquad (4.7)$$

$$E_П = \frac{kx^2}{2} = \frac{2\pi^2 m}{T^2} A^2 \sin^2(\omega \cdot t + \varphi).$$

7. Полная энергия:

$$E = \frac{2\pi^2 m}{T^2} A^2. \qquad (4.8)$$

8. Период колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (4.9)$$

где $l$ – длина нити, $g$ – ускорение свободного падения.

9. Период колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \qquad (4.10)$$

где $m$ – масса тела, закрепленного на пружине; $k$ – жесткость пружины.

10. Период колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mga}}, \qquad (4.11)$$

где $J$ – момент инерции тела относительно оси вращения, не проходящей через центр масс (центр тяжести); $m$ – масса тела; $a$ – расстояние от центра инерции (центра масс) до оси вращения.

11. Теорема Штейнера:

$$J = J_C + ma^2, \qquad (4.12)$$

где $J$ – момент инерции тела относительно оси вращения, не проходящей через центр масс; $J_c$ – момент инерции относительно оси, параллельной оси вращения и проходящей через центр тяжести.

12. Уравнение затухающих механических колебаний:

$$x = Ae^{-\delta \cdot t} \sin(\omega \cdot t + \varphi), \qquad (4.13)$$

где $A$ – начальная амплитуда, $Ae^{-\delta t}$ – амплитуда затухающих колебаний в момент времени $t$, $\omega$ – частота затухающих колебаний, $\varphi$ – начальная фаза, $\delta$ – коэффициент затухания.

13. Коэффициент затухания колебаний:

$$\delta = \frac{r}{2m}, \qquad (4.14)$$

где $m$ – масса тела, $r$ – коэффициент сопротивления.



14. Логарифмический декремент затухания:

$$\Theta = \ln\frac{A_n}{A_{n+1}}, \qquad (4.15)$$

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

15. Связь логарифмического декремента с коэффициентом затухания:

$$\Theta = \delta T, \qquad (4.16)$$

где $T$ – период затухающих колебаний.

## Примеры решения задач по теме №4

***Пример 4.1.*** Начальная фаза гармонического колебания $\varphi=0$. Через какое время (в долях периода) скорость точки будет равна половине ее максимальной скорости.

*Дано:* $\varphi=0$,

$$\upsilon = \frac{\upsilon_{max}}{2}.$$

*Найти:* $t$.

*Решение.*

Скорость $\upsilon$ точки, совершающей гармонические колебания определяется законом:

$$\upsilon = A\omega \cos(\omega \cdot t + \varphi), \qquad (4.1.1)$$

где $A$ – амплитуда колебания, $(\omega \cdot t + \varphi)$ – полная фаза колебания, $\varphi$ – начальная фаза, $\omega$ – собственная круговая частота колебания. Учитывая, что $\varphi=0$ и, зная, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$, перепишем (4.1.1):

$$\upsilon = A\frac{2\pi}{T}\cos(\frac{2\pi}{T} \cdot t). \qquad (4.1.2)$$

Скорость имеет максимальное значение при $\cos(\frac{2\pi}{T} \cdot t) = 1$, т.е.:

$$\upsilon_{max} = A\frac{2\pi}{T}, \qquad (4.1.3)$$

По условию $\upsilon = \frac{\upsilon_{max}}{2}$, следовательно, с учетом (4.1.2), (4.1.3) имеем:

$$A\frac{2\pi}{T}\cos(\frac{2\pi}{T} \cdot t) = A\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{1}{2},$$

$$\cos(\frac{2\pi}{T} \cdot t) = \frac{1}{2},$$

$$\frac{2\pi}{T} \cdot t = \arccos\frac{1}{2},$$

$$\frac{2\pi}{T} \cdot t = \frac{\pi}{3}.$$

Следовательно:

$$t = \frac{T}{6}.$$

*Ответ:* время, через которое скорость точки будет равна половине ее максимальной скорости $t = \frac{T}{6}$.

***Пример 4.2.*** Определить период колебаний стержня длиной *60 см* около оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец.

*Дано:* $L$*=60см=0,6м.*

***Найти:*** *Т.*

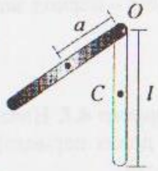


Рис. 3

*Решение.*

Стержень, имеющий возможность совершать вращение около горизонтальной оси *О*, не проходящей через центр масс (центр тяжести) *С*, есть физический маятник (рис. 3).

Для физического маятника период колебаний около неподвижной оси:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mga}}, \tag{4.2.1}$$

где $J$ – момент инерции относительно этой оси, $m$ – масса маятника, $a$ – расстояние от оси колебаний не проходящей через центр масс до центра тяжести (расстояние ОС). Момент инерции относительно оси *О*, проходящей через конец стержня, можно определить по теореме Штейнера:

$$J = J_C + ma^2, \tag{4.2.2}$$

где $J_c$ – момент инерции относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр тяжести, т.е. относительно оси *С*. Известно, что для однородного стержня, длиной $l$:

$$J_C = \frac{1}{12}ml^2 \tag{4.2.3}$$

Подставим (4.2.3) в (4.2.2) учитывая, что $a=l/2$:

$$J = \frac{1}{12}ml^2 + ma^2 = \frac{1}{12}ml^2 + m(\frac{l}{2})^2 = \frac{ml^2}{3}. \tag{4.2.4}$$

Подставив (4.2.4) в (4.2.1), получим:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m(l^2/3)}{mg(l/2)}} = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}. \tag{4.2.5}$$

Убедимся, что правило размерностей выполняется:

$$[T] = \frac{[l]^{1/2}}{[g]^{1/2}} = \frac{м^{1/2}}{м^{1/2}/с} = с.$$



Подставим в (4.2.5) числовые данные:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2 \cdot 0,6}{3 \cdot 9,81}} = 1,27с.$$

*Ответ:* период колебаний стержня *Т=1,27 с.*

### Задачи по теме №4

1. Через какое время от начала движения точка, совершающая гармонические колебания, будет иметь смещение от положения равновесия, равное половине амплитуды? Период колебаний 24 с, начальная фаза отсутствует.
2. Спустя какую часть периода после прохождения колеблющейся точки через положение равновесия ее скорость равна 1/2 от максимальной? На каком расстоянии от положения равновесия будет находиться точка в этот момент? Амплитуда колебаний 6 см.
3. Материальная точка массой 5 г совершает гармонические колебания с частотой 0,5 $с^{-1}$. Амплитуда колебаний 0,03 м. Определить скорость точки в момент, когда смещение ее равно 1,5 см.
4. На какое расстояние надо отвести от положения равновесия груз массой 640 г, закрепленный на пружине жесткостью 0,4 кН/м, чтобы он проходил положение равновесия со скоростью 1 м/с.
5. Груз, подвешенный к пружине, колеблется с амплитудой 2 см. Жесткость пружины 10 кН/м. Чему равна максимальная кинетическая энергия груза?
6. К пружине подвешен груз массой 20 кг. Пружина под действием силы 9,8 Н растягивается на 2,5 см. Найти период вертикальных колебаний груза.
7. Как соотносятся длины математических маятников, если за одно и то же время один совершает 20, а второй 40 колебаний?
8. За одно и то же время один математический маятник делает 50 колебаний, а другой 30 колебаний. Найти их длины, если один из маятников на 32 см короче другого.
9. Во сколько раз изменится полная механическая энергия колеблющегося маятника при уменьшении его длины в 3 раза и увеличения амплитуды колебаний в 2 раза?
10. Однородный круглый диск радиусом 40 см подвешен за край. Определить частоту его малых колебаний относительно точки подвеса.
11. Физический маятник представляет собой тонкий однородный стержень длиной 50 см. Определить на каком расстоянии от центра масс должна быть точка подвеса, чтобы период колебаний был равен 4с.
12. Обруч диаметром 60 см висит на гвозде, вбитом в стену, и совершает малые колебания в плоскости, параллельной стене. Найти период колебаний этого обруча.
13. Однородный шар подвешен на невесомой нити, длина которой равна радиусу шара. Определить длину нити, если период колебаний этого маятника 4 с.

14. Период затухающих колебаний 4 с, логарифмический декремент затухания 1,6. Начальная фаза равна нулю. В момент времени, равный четверти периода, смещение материальной точки 4,5 см. Написать уравнение этих затухающих колебаний.
15. Уравнение затухающих колебаний $x=5e^{-0.25t}sin(\pi t/2)$ м. Найти скорость этих колебаний в начальный момент времени и в момент времени, равный периоду колебаний.
16. За время 4 мин амплитуда затухающих колебаний маятника уменьшилась в 1,5 раза. Определить коэффициент затухания.
17. За одну минуту амплитуда колебаний математического маятника уменьшилась вдвое. Найти логарифмический декремент затухания, если длина маятника 1 м.
18. Логарифмический декремент затухания маятника равен 0,2. Во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за одно полное колебание маятника?
19. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 1 мин уменьшилась вдвое. Во сколько раз уменьшится амплитуда этих колебаний за 3 мин?
20. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 5 мин уменьшилась в 2 раза. За какое время, считая от начального момента, амплитуда уменьшится в 8 раз?
21. Амплитуда колебаний математического маятника длиной 1 м за 10 мин уменьшилась в 2 раза. Определить логарифмический декремент затухания.
22. Логарифмический декремент затухания колебаний маятника 0,003. Сколько полных колебаний должен сделать маятник, чтобы амплитуда уменьшилась в 2 раза?

## ТЕМА №5. ОПТИКА

### Законы и формулы к выполнению задач по теме №5

*Волновая оптика*

1. Условие максимума интерференции когерентных волн при падении света на тонкую пленку:

$$2dn\cos\beta = 2k\frac{\lambda}{2}. \qquad (5.1)$$

2. Условие минимума интерференции когерентных волн при падении света на тонкую пленку:

$$2dn\cos\beta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (5.2)$$

где $d$ – толщина пленки, $n$ – показатель преломления пленки, $\beta$ – угол преломления, $\lambda$ – длина волны света, $k$ – порядок максимума или минимума. Условия



максимума и минимума в пунктах 1 и 2 записаны для проходящего света. В отраженном свете условиям максимума и минимума обратны условиям в проходящем свете.

3. Радиус светлого кольца Ньютона в проходящем свете:

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}. \qquad (5.3)$$

4. Радиус темного кольца Ньютона в проходящем свете:

$$r_k = \sqrt{(2k-1)R\lambda}. \qquad (5.4)$$

5. Условие дифракционного максимума для одной щели:

$$a\sin\varphi = 2k\frac{\lambda}{2}. \qquad (5.5)$$

6. Условие дифракционного минимума для дифракционной решетки:

$$d\sin\varphi = 2k\frac{\lambda}{2}. \qquad (5.6)$$

В условиях 5 и 6 $a$ – ширина щели, $d$ – период дифракционной решетки, $\varphi$ – угол дифракции, $k$ – порядок максимума или минимума, $\lambda$ – длина волны света.

7. Закон Брюстера:

$$tg\,i_Б = \frac{n_2}{n_1}; \qquad (5.7)$$

$$i + \beta = 90^o, \qquad (5.8)$$

где $n_1$, $n_2$ – показатели преломления сред, $i_Б$ – угол падения, $\beta$ – угол преломления (рис. 4).

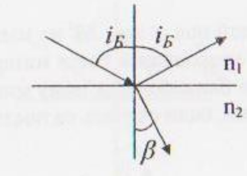


Рис. 4

8. Закон Малюса:

$$I_A = I_П\cos^2\varphi, \qquad (5.9)$$

где $I_П$ – интенсивность света, прошедшего поляризатор; $I_A$ – интенсивность света, прошедшего поляризатор и анализатор; $\varphi$ – угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

9. Интенсивность света, прошедшего поляризатор, связана с интенсивностью $I_0$ естественного света, падающего на поляризатор соотношением:

$$I_П = \frac{1}{2}I_o. \qquad (5.10)$$

*Тепловое излучение*

10. Закон Стефана-Больцмана:

$$R_Э = \sigma T^4, \qquad (5.11)$$

где $R_Э$ – энергетическая светимость (излучательность) абсолютно черного тела, $T$ – термодинамическая температура, $\sigma$ – постоянная Стефана-Больцмана.
11. Если излучаемое тело не является абсолютно черным, то

$$R_Э' = \varepsilon\sigma T^4, \ \varepsilon < 1. \qquad (5.12)$$

12. Мощность излучения абсолютно черного тела:

$$N = R_Э S, \qquad (5.13)$$

где $S$ – площадь излучающей поверхности.
13. Первый закон Вина:

$$\lambda_{max} T = C_1, \qquad (5.14)$$

где $\lambda_{max}$ – длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения, $T$ – термодинамическая температура, $C_1 = 2.9\cdot 10^{-3}$ *м·К*.
14. Второй закон Вина:

$$r\lambda_{max} = C_2 T^5, \qquad (5.15)$$

где $r$ – спектральная плотность энергетической светимости, $C_2 = 1{,}29\cdot 10^{-5}$ *Вт/(м³·К⁵)*.

## Примеры решения задач по теме №5

***Пример 5.1.*** Белый свет, падающий под углом $30^0$ на мыльную пленку с показателем преломления $1{,}33$, дает в проходящем свете интерференционный максимум на волне длиной $\lambda_1 = 693$ *нм* и ближайший к нему минимум на волне длиной $\lambda_2 = 630$ *нм*. Какова толщина пленки, если считать ее постоянной?

*Дано:* $\lambda_1 = 693$ *нм* $= 693\cdot 10^{-9}$ *м*,
$\lambda_2 = 630$ *нм* $= 630\cdot 10^{-9}$ *м*,
$n = 1{,}33$,
$\alpha = 30^0$,

***Найти:*** $d$

*Решение*

Запишем условия максимума и минимума интерференции в проходящем свете:

$$2dn\cos\beta = 2k_1\frac{\lambda_1}{2}; \qquad (5.1.1)$$

$$2dn\cos\beta = (2k_2 + 1)\frac{\lambda_2}{2}. \qquad (5.1.2)$$

Здесь $d$ – толщина пленки, $n$ – показатель преломления пленки, $\beta$ – угол преломления, $\lambda$ – длина волны света, $k_1$ – порядок максимума, $k_2$ – порядок соседнего минимума.



По условию $k_2 = k_1 + 1$. Вычтем из (5.1.2) (5.1.1):

$$2dn\cos\beta - 2dn\cos\beta = (2k_2 + 1)\frac{\lambda_2}{2} - 2k_1\frac{\lambda_1}{2};$$

$$0 = 2k_2\frac{\lambda_2}{2} + \frac{\lambda_2}{2} - 2k_1\frac{\lambda_1}{2};$$

$$0 = k_2\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{2} - k_1\lambda_1;$$

$$0 = (k_1 + 1)\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{2} - k_1\lambda_1; \qquad (5.1.3)$$

$$0 = k_1\lambda_2 + \lambda_2 + \frac{\lambda_2}{2} - k_1\lambda_1;$$

$$0 = k_1(\lambda_2 - \lambda_1) + \frac{3\lambda_2}{2};$$

$$k_1 = \frac{3\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}.$$

Подставим в последнее уравнение системы (5.1.3) числовые данные:

$$k_1 = \frac{3\cdot 630\cdot 10^{-9}\ м}{2(693 - 630)\cdot 10^{-9}\ м} = 15. \qquad (5.1.4)$$

Используя закон преломления, определим угол преломления $\beta$ (рис.5):

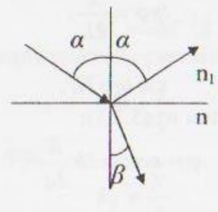


Рис.5

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n}{n_1}, \qquad (5.1.5)$$

$$\sin\beta = \frac{n_1\sin\alpha}{n}.$$

Полагая, что $n_1 = 1$ (показатель преломления воздуха) получим:

$$\beta = \arcsin\frac{\sin 30}{1{,}33} = 22{,}1^0.$$

Выразим из (5.1.1) $d$ и подставим числовые данные:

$$d = \frac{k_1 \lambda_1}{2n_2 cos\beta} = \frac{15 \cdot 693 \cdot 10^{-9}\, м}{2 \cdot 1,33 \cdot cos22,1} = 5,9 \cdot 10^{-6}\, м = 4,2 мкм\,.$$

*Ответ:* толщина пленки $d$=*4,2 мкм*.

***Пример 5.2.*** Монохроматический свет с длиной волны $\lambda$=*550 нм* нормально падает на узкую щель шириной *0,1 мм*. Определить расстояние между первыми дифракционными минимумами, наблюдаемыми на экране, расположенном параллельно щели на расстоянии *1,5 м* от нее.

*Дано:* $\lambda=550\, нм=550 \cdot 10^{-9}\, м$,
$a=0,1\, мм=0,1 \cdot 10^{-3}\, м$,
$k=1$,
$L=1,5\, м$.

*Найти:* $x$.

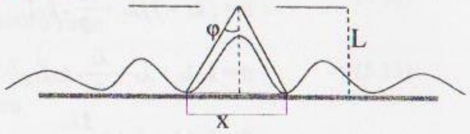


Рис.6

*Решение*

На рис. 6 представлена картина распределения интенсивности света на экране при дифракции на щели. Запишем условие минимума интенсивности на щели:

$$a sin\varphi = 2k\frac{\lambda}{2}5\,, \tag{5.2.1}$$

где $a$ – ширина щели, $\varphi$ – угол дифракции, $k$ – порядок минимума, $\lambda$ – длина волны света.

Из рисунка видно, что

$$tg\varphi = \frac{x}{2L}\,. \tag{5.2.2}$$

Отсюда

$$x = tg\varphi 2L\,. \tag{5.2.3}$$

Значение угла дифракции $\varphi$ найдем из (5.2.1):

$$\varphi = arcsin 2k\frac{\lambda}{2a}\,. \tag{5.2.4}$$

Подставим числовые данные:

$$\varphi = arcsin 2 \cdot 1 \cdot \frac{550 \cdot 10^{-9}\, м}{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}\, м} = 0,32^0\,. \tag{5.2.5}$$

Из (5.2.3) найдем значение $x$:

$$x = tg0,32 \cdot 2 \cdot 1,5 м = 0.016 м = 16 мм\,.$$

*Ответ:* расстояние между первыми дифракционными минимумами $x$=*16 мм*.

***Пример 5.3.*** Мощность излучения раскаленной металлической поверхности *0,67кВт*. Температура излучающей поверхности *2500 К*, ее площадь *10 см²*. Какую мощность излучения имела бы эта поверхность, если бы она была абсо-



лютно черной? Найти отношение $\varepsilon$ энергетических светимостей этой поверхности и абсолютно черного тела.

*Дано:* $N'=0,67\, кВт=0,67 \cdot 10^3\, Вт$,
$T=2500\, К$,
$S=10 см^2=10 \cdot 10^{-4}\, м^2$.

*Найти:* $N$, $\varepsilon$.

*Решение*

Запишем формулу для мощности излучения абсолютно черного тела:

$$N = R_э S\,. \tag{5.3.1}$$

Здесь $R_э$ – энергетическая светимость абсолютно черного тела, $S$ – площадь излучающей поверхности.

По закону Стефана-Больцмана:

$$R_э = \sigma T^4\,. \tag{5.3.2}$$

Здесь $T$ – термодинамическая температура, $\sigma$ – постоянная Стефана – Больцмана.

Подставив (5.3.2) в (5.3.1), получим:

$$N = \sigma T^4 S\,. \tag{5.3.3}$$

Подставим в (5.3.3) числовые данные:

$$N = 5,76 \cdot 10^{-8}\, \frac{Вт}{м^2 \cdot K^4} \cdot 2500^4\, K^4 \cdot 10 \cdot 10^{-4}\, м^2 = 2,22 \cdot 10^3\, Вт = 2,22 кВт\,.$$

Если излучаемое тело не является абсолютно черным, то

$$R'_э = \varepsilon\sigma T^4\,. \tag{5.3.4}$$

Следовательно:

$$N' = \varepsilon\sigma T^4 S\,. \tag{5.3.5}$$

Найдем $\varepsilon$ как отношение энергетических светимостей:

$$\varepsilon = \frac{R'_э}{R_э}\,. \tag{5.3.6}$$

Из (5.3.2) и (5.3.3) следует, что:

$$R_э = \frac{N}{S}\,. \tag{5.3.7}$$

А из (5.3.4) и (5.3.5) следует, что:

$$R'_э = \frac{N'}{S}\,. \tag{5.3.8}$$

С учетом (5.3.7) и (5.3.8) получим выражение для $\varepsilon$:

$$\varepsilon = \frac{N'S}{SN} = \frac{N'}{N}\,. \tag{5.3.9}$$

Подставим в (5.3.9) числовые данные:

$$\varepsilon = \frac{0,67 \cdot 10^3}{2,22 \cdot 10^3} = 0,3\,.$$

*Ответ:* мощность излучения абсолютно черной поверхности *N=2,22 кВт*, отношение энергетических светимостей этой поверхности и абсолютно черного тела $\varepsilon=0,3$.

### Задачи по теме №5

1. Белый свет, падающий нормально на мыльную пленку постоянной толщины с показателем преломления 1,33, и отраженный от нее, дает в видимом спектре интерференционный максимум на волне длиной 630 нм и ближайший к нему минимум на волне длиной 450 нм. Какова толщина пленки?
2. Монохроматический свет с длиной волны 550 нм нормально падает на установку для получения колец Ньютона. Определить толщину воздушного зазора между плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзы в том месте, где в отраженном свете наблюдается четвертое темное кольцо.
3. При наблюдении колец Ньютона в проходящем свете длиной волны 650 нм определяется толщина слоя воздуха там, где видно шестое светлое кольцо. Какова эта толщина?
4. На щель шириной 1800 нм нормально падает пучок света от разрядной трубки. В каком направлении $\varphi$ совпадают минимумы линий $\lambda_1$=640 нм и $\lambda_2$=400 нм. ($k_1 \neq k_2$).
5. Постоянная дифракционной решетки в 4 раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.
6. На поверхность дифракционной решетки нормально падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в 4,6 раза больше длины световой волны. Найти общее число дифракционных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.
7. Пучок параллельных лучей монохроматического света падает нормально на дифракционную решетку. Угол дифракции для спектра второго порядка $10^0$. Каким будет угол дифракции для спектра пятого порядка?
8. Угол падения луча на поверхность жидкости $50^0$. Отраженный луч максимально поляризован. Определить угол преломления луча.
9. Найти показатель преломления вещества, если луч света, отраженный от него полностью поляризован при угле преломления $36^0$.
10. Интенсивность естественного света, прошедшего два николя, уменьшилась в 8 раз. Определить угол между главными плоскостями николей. Поглощением света пренебречь.
11. Какую энергетическую светимость имеет затвердевающее серебро, не являющееся абсолютно черным телом? Отношение энергетических светимостей серебра и абсолютно черного тела для температуры 960 $^0$C равно $\varepsilon$=0,6.



12. Температура абсолютно черного тела при охлаждении понизилась с 1000 до 850 К. Определить, как и на сколько при этом изменилась длина волны, отвечающая максимуму энергии излучения.
13. На сколько процентов увеличится энергетическая светимость абсолютно черного тела, если температура увеличится на 1%?
14. Температура абсолютно черного тела 2000 К. Определить длину волны, на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости тела (его излучательности) для этой длины волны.

## ТЕМА №6. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА

### Законы и формулы к выполнению задач по теме №6

1. Энергия фотона:

$$E = h\nu, \tag{6.1}$$

где $\nu$ – частота фотона, $h$ – постоянная Планка.

2. Импульс фотона:

$$p = \frac{h\nu}{c}, \tag{6.2}$$

где $c$ – скорость света в вакууме.

3. Длина волны связана с частотой света соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \tag{6.3}$$

4. Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{m_e \upsilon_{max}^2}{2} \quad \text{при} \quad \frac{m_e \upsilon_{max}^2}{2} < 5кэВ, \tag{6.4}$$

$$h\nu = A + T \quad \text{при} \quad T > 5кэВ. \tag{6.5}$$

Здесь $A$ – работа выхода электрона из металла, $m_e$ – масса покоя электрона, $\upsilon_{max}$ – максимальная скорость фотоэлектрона, $T$ – релятивистская кинетическая энергия электрона.

$$T = m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \upsilon_{max}^2 / c^2}} - 1 \right). \tag{6.6}$$

5. Красная граница фотоэффекта:

$$\lambda_{max} = \frac{ch}{A}, \tag{6.7}$$

где $\lambda_{max}$ – максимальная длина волны света, падающего на поверхность металла, при которой еще возможен фотоэффект.

6. Длина волны *де Бройля*:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon}, \tag{6.8}$$

где $\lambda$ – длина волны, связанная с частицей, обладающей импульсом $p$; $\upsilon$ – скорость частицы; $m$ – масса движущейся частицы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\upsilon_{max}^2/c^2}}, \tag{6.9}$$

где $m_0$ – масса покоящейся частицы. Если $\upsilon << c$, то $\lambda = \frac{h}{m_0\upsilon}$.

## Примеры решения задач по теме №6

***Пример 6.1.*** Определить красную границу фотоэффекта для цезия, если при облучении его поверхности фиолетовыми лучами длиной волны *400 нм* максимальная скорость фотоэлектронов $6{,}5\cdot10^5$ *м/с*.

*Дано:* $\lambda$=400нм=$400\cdot10^9$м,

$\upsilon_{max}=6{,}5\cdot10^5$ *м/с.*

*Найти:* $\lambda_{max}$.

*Решение.*

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{m_e\upsilon_{max}^2}{2}, \tag{6.1.1}$$

где $h\nu$ – энергия кванта света, падающего на поверхность металла; $A$ – работа выхода электронов; $m$ – масса электрона; $\upsilon_{max}$ – максимальная скорость фотоэлектронов.

Наименьшая энергия кванта света, при которой еще возможен фотоэффект с поверхности металла, запишется из условия $m\upsilon_{max}^2/2 = 0$. Тогда

$$h\nu_{min} = A. \tag{6.1.2}$$

Из соотношения, связывающего длину волны и частоту света, следует, что

$$\nu_{min} = \frac{c}{\lambda_{max}}. \tag{6.1.3}$$

Перепишем (2):

$$h\frac{c}{\lambda_{max}} = A. \tag{6.1.4}$$

Из (6.1.4) следует, что

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{A} \tag{6.1.5}$$



Работу выхода электронов $A$ выразим из (6.1.1):

$$A = h\nu - \frac{m_e\upsilon_{max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{m_e\upsilon_{max}^2}{2}. \tag{6.1.6}$$

Подставив (6.1.6) в (6.1.5), окончательно получим:

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{\frac{hc}{\lambda} - \frac{m_e\upsilon_{max}^2}{2}}. \tag{6.1.7}$$

Проверим размерность результата (6.1.7).

$$\lambda_{max} = \frac{Дж\cdot с\cdot\frac{м}{с}}{\frac{Дж\cdot с\cdot\frac{м}{с}}{м} - кг\cdot\frac{м^2}{с^2}} = \frac{Дж\cdot м}{Дж - Дж} = м.$$

Подставим числовые данные в выражение (6):

$$\lambda_{max} = \frac{6{,}62\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^8}{\frac{6{,}62\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^8}{400\cdot10^9} - \frac{9{,}1\cdot10^{-31}\cdot(6{,}5\cdot10^5)^2}{2}} = 650\cdot10^{-9}\,м = 650нм.$$

*Ответ:* красная граница фотоэффекта для цезия $\lambda_{max}$=*650нм.*

## Задачи по теме №6

1. С какой скоростью должна двигаться $\alpha$ – частица, чтобы ее импульс был равен импульсу фотона с длиной волны 520 нм?
2. Какой импульс должен иметь фотон, чтобы его масса была равна массе покоя электрона?
3. Вычислить длину волны фотона, энергия которого равна энергии покоя электрона.
4. Облучение литиевого фотокатода производится фиолетовыми лучами, длина волны которых 400 мкм. Определить скорость фотоэлектронов, если красная граница фотоэффекта для лития равна 520 мкм.
5. Кинетическая энергия электронов, выбитых из цезиевого фотокатода, равна 3 эВ. Определить, при какой максимальной длине волны света выбивается этот электрон. Работа выхода электрона для цезия 1,9 эВ.
6. Фотон с длиной волны 0,2 мкм вырывает с поверхности натрия фотоэлектрон, кинетическая энергия которого 2 эВ. Определить работу выхода и красную границу фотоэффекта.
7. 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.

8. Свет с длиной волны 150 нм падает на поверхность калия. Определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов. Работа выхода электрона для калия 2,0 эВ.
9. На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны 200 нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов, которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок. Работа выхода электрона для лития 2,7 эВ.
10. Какова должна быть длина волны $\gamma$ – излучения, падающего на платиновую пластину, если максимальная скорость фотоэлектронов $3\cdot10^6$ м/с? Работа выхода электрона для платины 5,3 эВ.
11. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,25 мкм. Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов 0,98 В. Определить работу выхода электронов из металла.
12. Какова должна быть длина волны ультрафиолетовых лучей, падающих на поверхность некоторого металла, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна $10^7$ м/с? Работой выхода пренебречь.
13. На металл падают рентгеновские лучи длиной волны 4 нм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость фотоэлектронов.
14. Вычислить длину волны де Бройля для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 22,5 В.
15. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля была равна: 1) 1 нм; 2) 1 пм?
16. Протон обладает кинетической энергией 1 кэВ. Определить дополнительную энергию, которую нужно ему сообщить для того, чтобы длина волны де Бройля уменьшилась в три раза.
17. Определить длины волн де Бройля $\alpha$ – частицы и протона, прошедших одинаковую разность потенциалов, равную 1 кВ.
18. Электрон обладает кинетической энергией 1,02 МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия электрона уменьшится вдвое?
19. Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.
20. Масса движущегося электрона в 2 раза больше массы покоя. Определить длину волны де Бройля для такого электрона.



## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА


1. Савельев И.В. Курс общей физики в пяти книгах: учеб. пособие для втузов, кн.1-3.— М.: ООО «Издательство Арстель»: ООО «Издательство АСТ», 2003.-256с
2. Детлаф А.А., Яворский Б. М. Курс физики. Учеб. пособие для втузов.— М.: Издательский центр «Академия», 2007.-720 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. — М.: Издательский центр «Академия», 2007.-560 с.
4. Методические указания по решению задач по теме “Кинематика. Динамика поступательного движения. Молекулярная физика и термодинамика. Законы постоянного тока. Электромагнитная индукция. Колебания и волны” общего курса физики для студентов заочного факультета специальностей ЭУС и ПГС(с). Тарханов А.К. Воронеж, ВГАСУ, 2002.
5. Физико-математический словарь студента, Ч. 1. Тарханов А.К., М.П. Сумец. Воронеж, ВГАСУ, 2005.
6. Физико-математический словарь студента, Ч. 2. Тарханов А.К., М.П. Сумец. Воронеж, ВГАСУ, 2006.
7. Электричество и магнетизм. Методические указания. Тарханов А.К., В.Н. Белко. Воронеж, ВГАСУ, 2009.

Приложение

## Фундаментальные физические постоянные

| Постоянная | Значение |
|---|---|
| Ускорение свободного падения на Земле | $g = 9{,}8$ м/с$^2$ |
| Гравитационная постоянная | $G = 6{,}7 \cdot 10^{-11}$ Н·м$^2$/ кг$^2$ |
| Число Авогадро | $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ |
| Постоянная Больцмана | $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К |
| Универсальная газовая постоянная | $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К) |
| Заряд электрона | $e = -1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Электрическая постоянная | $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Кл$^2$/ (Н·м$^2$) |
| Магнитная постоянная | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м |
| Масса покоя электрона | $m_e = 9{,}10 \cdot 10^{-31}$ кг |
| Масса покоя протона | $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Постоянная Стефана-Больцмана | $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2$·К$^4$) |
| Постоянная Планка | $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |

## Множители и приставки СИ для десятичных кратных и дельных единиц

| Приставка | Обозначение (рус., межд.) | Множитель | Приставка | Обозначение (рус., межд.) | Множитель |
|---|---|---|---|---|---|
| экса | Э, E | $10^{18}$ | деци | д, d | $10^{-1}$ |
| пета | П, P | $10^{15}$ | санти | с, c | $10^{-2}$ |
| тера | Т, T | $10^{12}$ | милли | м, m | $10^{-3}$ |
| гига | Г, G | $10^{9}$ | микро | мк, μ | $10^{-6}$ |
| мега | М, M | $10^{6}$ | нано | н, n | $10^{-9}$ |
| кило | к, k | $10^{3}$ | пико | п, p | $10^{-12}$ |
| гекто | г, h | $10^{2}$ | фемто | ф, f | $10^{-15}$ |
| дека | да, da | $10^{1}$ | атто | а, a | $10^{-18}$ |



## Оглавление

**Механика. Молекулярная физика и термодинамика.**
**Электричество и магнетизм. Колебания и волны.**
**Оптика. Элементы квантовой механики,**
**атомной и ядерной физики**

*Методические указания и контрольные задания*
*по физике для студентов всех специальностей*
*факультета дистанционного обучения*
(Часть II)

Составители: Андрей Константинович Тарханов,
Анна Игоревна Никишина,
Юрий Степанович Золототрубов

Редактор Черкасова Т.О.

Подписано в печать 09.03.2011. Формат 60x84 1/16. Уч. - изд. л.2.0.Усл. - печ. л. 2.1.
Бумага писчая. Тираж 250 экз. Заказ №80.

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии Воронежского государственного
архитектурно - строительного университета
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84