

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ФИЗИКЕ**

*для студентов заочной формы обучения*

(К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ №2)

Благовещенск

Издательство ДальГАУ

2015

УДК 53 (0.76.5)

Методические указания и контрольные задания по физике для студентов-заочников по направлению подготовки ФГОС ВО:

Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов  
(к контрольной работе №2) составлены Кривуца З.Ф. и Левицкой Н.В.

Методические указания имеют целью оказание помощи студентам-заочникам в самостоятельной работе.

В пособии даны все необходимые формулы и примеры решения задач по разделам программы, изучаемым в процессе выполнения контрольной работы №2. Методические указания будут полезны студентам инженерных специальностей.

Рецензент:                    доцент Мельников А.С., зав. кафедрой электротехники и электроники, Почетный работник Высшего профессионального образования.

Печатается по решению методического совета института электрификации и автоматизации сельского хозяйства. Протокол №6 от 4 февраля 2015 года.

Издательство ДальГАУ

2015

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ- ЗАОЧНИКОВ 2 КУРСА ОБУЧЕНИЯ

### Часть 2

#### Постоянный электрический ток

Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования. Классическая электронная теория электропроводности металлов и ее опытные обоснования. Закон Ома в интегральной форме. Разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение. Ток в газах. Плазма. Работа выхода электронов из металла. Термоэлектронная эмиссия.

#### Электромагнетизм

Магнитное поле. Магнитная индукция. Закон Ампера. Магнитное поле тока. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитного поля. Магнитное поле прямолинейного проводника с током. Магнитное поле кругового тока. Магнитный момент витка с током. Вихревой характер магнитного поля. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Принцип действия циклических ускорителей заряженных частиц. Эффект Холла.

МГД-генератор. Контур с током в магнитном поле. Магнитный поток. Работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции (опыт Фарадея). Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции и его вывод из закона сохранения энергии. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при замыкании и размыкании цепи. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Объемная плотность энергии магнитного поля.

Магнитное поле в веществе. Магнитные моменты атомов. Типы магнетиков. Намагниченность. Микро- и макроток. Элементарная теория

диа- и парамагнетиков. Магнитная восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики. Опыты Столетова. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Домены. Спиновая природа ферромагнетизма.

### Электромагнитные колебания и волны

Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний. Электрический колебательный контур. Энергия электромагнитных колебаний. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний и его решение. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Случай резонанса. Электромагнитные волны. Основное уравнение электромагнитных волн. Монохроматическая волна. Энергия электромагнитных волн.

### Волновая оптика

Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Прямолинейное распространение света. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа-Брэгга. Принцип голографии. Исследование структуры кристаллов. Оптически неоднородная среда. Дисперсия света. Поляризация света. Естественный поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Поляроиды и поляризационные призмы. Закон Малюса.

## Квантовая природа излучения

Тепловое излучение. Черное тело. Закон Кирхгофа. Закон Стефана-Больцмана. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Квантовая гипотеза и формула Планка. Оптическая пирометрия. Внешний фотоэффект и его законы. Внутренний и вентильный фотоэффект. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Диэлектрическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

## Элементы атомной физики, квантовой механики и физики атомного ядра

Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма свойств вещества. Формула де Бройля. Многоэлектронные атомы. Распределение электронов в атоме по энергетическим состояниям и электронным оболочкам. Принцип Паули. Спектры атомов и молекул. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения. Понятие о лазере.

Примесная проводимость полупроводников. Электронный и примесный полупроводники. Контактные явления. Контакт электронного и дырочного полупроводника ( $p$ - $n$ -переход) и его вольтамперная характеристика. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Люминесценция твердых тел.

Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Состав ядра. Нуклоны. Дефект массы и энергия связи ядра. Закономерности и происхождение альфа-, бета- и гамма-излучений атомных ядер. Ядерные реакции и законы сохранения. Реакция деления ядер. Цепная реакция деления. Понятие о ядерной энергетике. Понятие об основных проблемах современной физики и астрофизики.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т.И. Курс физики /Т.И.Трофимова. –М: Высшая школа, 2012 .- 542 с.
2. Детлаф, А.А. Курс физики /А.А.Детлаф, Б.М.Яворский . –М: Высшая школа, 2012. -608 с.
3. Грабовский, Р.И. Курс физики /Р.И.Грабовский. –М: Высшая школа, 2000.- 607 с.
4. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики /Т.И.Трофимова, З.Г.Павлова. -М: Высшая школа, 2012. – 591 с.
5. Физика | теория и технология решения задач /под общей редакцией В.А.Яковенко. -Минск: НТООО «Тетра Системс», 2010. – 560 с.
6. Волькинштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики /В.С.Волькинштейн.-М: Наука, 2014.
7. Чертов, А.Г. Задачник по физике/А.Г.Чертов, А.А.Воробьев.-М: Высшая школа,2013.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

Таблица вариантов

Вариант	Номера задач											
0	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420
1	301	311	321	331	341	351	361	371	381	391	401	411
2	302	312	321	332	342	352	362	372	382	392	402	412
3	303	313	323	333	343	353	363	373	383	393	403	413
4	304	314	324	334	344	354	364	374	384	394	404	414
5	305	315	325	335	345	355	365	375	385	395	405	415
6	306	316	326	336	346	356	366	376	386	396	406	416
7	307	317	327	337	347	357	367	377	387	397	407	417
8	308	318	328	338	348	358	368	378	388	398	408	418
9	309	319	329	339	349	359	369	379	389	399	409	419

Правила оформления работы такие же, как при выполнении контрольных работ № 1 и № 2.

## 3.1 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## Основные формулы

Сила тока

$$I = \frac{Q}{t},$$

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

Плотность тока

$$j = \frac{I}{S},$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения проводника.

Связь плотности тока со средней скоростью  $\langle v \rangle$  направленного движения заряженных частиц

$$j = Q \cdot n \cdot \langle v \rangle,$$

где  $Q$  – заряд частицы;

$n$  – концентрация заряженных частиц.

Законы Ома:

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

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

$R$  – сопротивление участка.

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

где  $\varepsilon$  – ЭДС постоянного тока;

$R$  – полное сопротивление участка ( сумма внешних и внутренних сопротивлений).

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

где  $R$ - внешнее сопротивление цепи;

$r$ - внутреннее сопротивление цепи.

Законы Кирхгофа:

$$\text{а) } \sum I_i = 0 \text{ - первый закон,}$$

где  $\sum I_i$  - алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле.

$$\text{б) } \sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i \text{ - второй закон,}$$

где  $\sum I_i R_i$  -алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления участков контура;

$\sum \varepsilon_i$  - алгебраическая сумма ЭДС.

Сопротивление  $R$  и проводимость  $G$  проводника

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad G = \frac{\gamma S}{l},$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление;

$\gamma$  - удельная проводимость;



$l$  - длина проводника;

$S$  – площадь поперечного сечения.

Сопротивление системы проводников:

а)  $R = \sum R_i$  - при последовательном сопротивлении;

б)  $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$  - при параллельном соединении,

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

Работа тока:

$$A = IUt, \quad A = I^2 R t, \quad A = \frac{U^2 t}{R}.$$

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

Мощность тока:

$$P = IU, \quad P = I^2 R, \quad P = \frac{U^2}{R}.$$

Закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 R t.$$

Закон Ома в дифференциальной форме

$$j = \gamma E,$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость;

$E$  – напряженность электрического поля;

$j$  – плотность тока.

Связь удельной проводимости  $\gamma$  с подвижностью  $b$  заряженных частиц (ионов)

$$\gamma = q n (b_+ + b_-),$$

где  $q$  - заряд иона;

$n$  – концентрация ионов;

$b_+$  и  $b_-$  - подвижности положительных и отрицательных ионов.

## Примеры решения задач

Пример 1. При внешнем сопротивлении  $R_1 = 8 \text{ Ом}$  сила тока в цепи  $I_1 = 0,7 \text{ А}$ , при сопротивлении  $15 \text{ Ом}$  сила тока  $0,5 \text{ А}$ . Определить силу тока при коротком замыкании.

Дано:

$I_1 = 0,7 \text{ А}$

$R_1 = 8 \text{ Ом}$

$I_2 = 0,5 \text{ А}$

$R_2 = 15 \text{ Ом}$

$I_{\text{кз}} = ?$

Решение.

По закону Ома

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}, \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}$$

$$\varepsilon = I_1 \cdot (R_1 + r), \quad \varepsilon = I_2 \cdot (R_2 + r).$$

$$I_1 \cdot (R_1 + r) = I_2 \cdot (R_2 + r)$$

$$I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r$$

$$r(I_1 - I_2) = I_2 R_2 - I_1 R_1$$

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2} = \frac{0,5 \cdot 15 - 8 \cdot 0,7}{0,7 - 0,5} = \frac{7,5 - 5,6}{0,2} = \frac{1,9}{0,2} = 9,5 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon = I_1 (R_1 + r) = 0,7 \cdot (8 + 9,5) = 0,7 \cdot 17,5 = 12,25 \text{ В}$$

$$I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r} = \frac{12,25}{9,5} \approx 1,3 \text{ А}$$

Ответ:  $I_{\text{кз}} \approx 1,3 \text{ А}$ 

Пример 2. Два элемента с электродвижущими силами  $\varepsilon_1 = 3,0 \text{ В}$ ,  $\varepsilon_2 = 2,0 \text{ В}$  и с внутренними сопротивлениями  $r = 0,5 \text{ Ом}$  каждый соединены параллельно и замкнуты на некоторое внешнее сопротивление  $R$ . Найти внешнее сопротивление и силу тока во всех участках цепи, если показания вольтметра  $V$ , подключенного к узлам, равны: 1)  $1,8 \text{ В}$ ; 2)  $2 \text{ В}$ ; 3)  $2,2 \text{ В}$ .

Применим обобщенный закон Ома  $U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon$  к каждому из участков цепи, учитывая, что сила тока через внешнее сопротивление равна алгебраической сумме сил токов в первом и втором элементах, то есть

$$I = i_1 + i_2.$$

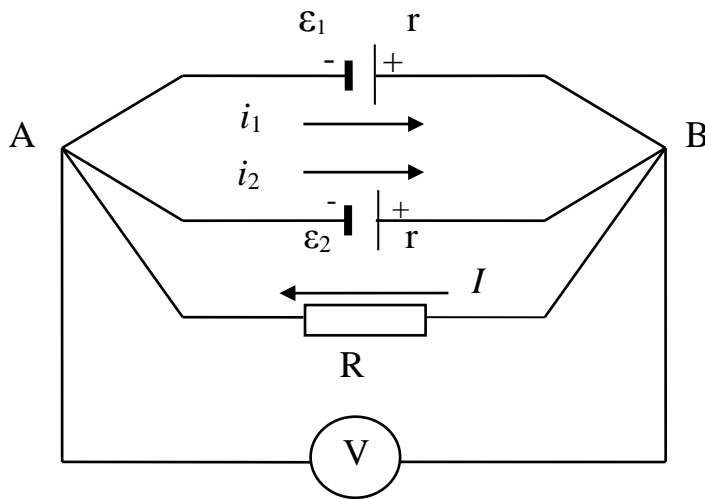


Рис. 3.1.1

На участке  $A\varepsilon_1B$

$$i_1 r = \varphi_A - \varphi_B + \varepsilon_1,$$

откуда

$$i_1 = \frac{\varepsilon_1 - U}{r}.$$

Согласно условию для трех

значений  $U$  получим:

- 1)  $i_1 = 2,4$  А;      2)  $i_1 = 2$  А;      3)  $i_1 = 1,6$  А.

Аналогично для участка  $A\varepsilon_2B$  находим

$$i_2 r = \varphi_A - \varphi_B + \varepsilon_2,$$

откуда

$$i_2 = \frac{\varepsilon_2 - U}{r}.$$

Соответственно для трех случаев получим

- 1)  $i_2 = 0,4$  А;      2)  $i_2 = 0$ ;      3)  $i_2 = -0,4$  А.

Сила тока через сопротивление  $R$  равна

$$I = i_1 + i_2.$$

- 1)  $I = 2,8$  А;      2)  $I = 2$  А;      3)  $I = 1,2$  А.

Внешнее сопротивление можно вычислить, используя закон Ома для участка  $BRA$ .

$$R = \frac{U}{I}.$$

- 1)  $R = 0,64$  Ом;      2)  $R = 1,0$  Ом;      3)  $R = 1,8$  Ом.

Ответ: 1)  $i_1 = 2,4$  А;      2)  $i_1 = 2$  А;      3)  $i_1 = 1,6$  А.

1)  $i_2 = 0,4$  А;      2)  $i_2 = 0$ ;      3)  $i_2 = -0,4$  А.

1)  $I = 2,8$  А;      2)  $I = 2$  А;      3)  $I = 1,2$  А.

1)  $R = 0,64$  Ом;      2)  $R = 1,0$  Ом;      3)  $R = 1,8$  Ом.

Пример 3. Три гальванических элемента с электродвижущими силами  $\varepsilon_1 = 2,5$  В,  $\varepsilon_2 = 2,2$  В и  $\varepsilon_3 = 3,0$  В и с внутренними сопротивлениями по 0,2 Ом каждый включены, как показано на схеме рисунка 3.1.2. Внешнее сопротивление  $R = 4,7$  Ом. Найти силы токов во всех участках цепи, разность потенциалов между узлами, количество джоулевой теплоты, выделяющееся во всей цепи, и работу каждого элемента за время  $\tau = 1$  с.

Выберем направление токов так, как показано на рисунке 3.1.2.

Применяя II правило Кирхгофа к контурам  $A\varepsilon_3RB\varepsilon_1A$  и  $A\varepsilon_3RB\varepsilon_2A$  и I правило Кирхгофа к одному из узлов, получаем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I(r+R) + i_1 r &= \varepsilon_3 - \varepsilon_2 \\ I(r+R) + i_2 r &= \varepsilon_3 - \varepsilon_1 \\ I &= i_1 + i_2 \end{aligned} \right\}$$



Рис. 3.1.2

Совместное решение этих уравнений дает результат:

$$I = 0,13 \text{ А}; \quad i_1 = -0,68 \text{ А}; \quad i_2 = 0,82 \text{ А}.$$

Знак « - » перед током  $i_1$  означает, что выбранное направление его ошибочно, в действительности ток  $i_1$  течет от А к В.

Разность потенциалов между узлами можно найти, применяя обобщенный закон Ома к любому участку.

На участке  $B\varepsilon_1A$

$$i_1 r = \varphi_B - \varphi_A - \varepsilon_1;$$

$$\varphi_B - \varphi_A = \varepsilon_1 + i_1 r = 2,36 \text{ В}.$$

На участке  $B\varepsilon_3A$

$$-I(R+r) = \varphi_B - \varphi_A - \varepsilon_3;$$

$$\varphi_B - \varphi_A = \varepsilon_3 - I(R+r) = 2,36 \text{ В}.$$

До вычисления разности потенциалов между узлами только из направлений токов можно предсказать, что искомая разность потенциалов должна быть больше, чем  $\varepsilon_2$  (ток  $i_2$  течет от положительного полюса элемента к отрицательному, следовательно, стороннее поле внутри второго элемента слабее кулоновского) и меньше, чем  $\varepsilon_1$  (ток  $i_1$  идет от «-» к «+» элемента, следовательно, стороннее поле внутри первого элемента сильнее кулоновского).

Количество джоулевой теплоты, выделяющееся за 1 с во всей цепи,

$$Q_{\text{дж}} = I^2(R + r) + i_1^2 r + i_2^2 r = 0,31 \text{ Дж.}$$

Работа, совершаемая первым и третьим элементами, положительна и соответственно равна

$$A_1 = -i_1 \varepsilon_1 = 1,70 \text{ Дж;}$$

$$A_3 = I \varepsilon_3 = 0,39 \text{ Дж.}$$

Работа, совершаемая вторым элементом, отрицательна и равна

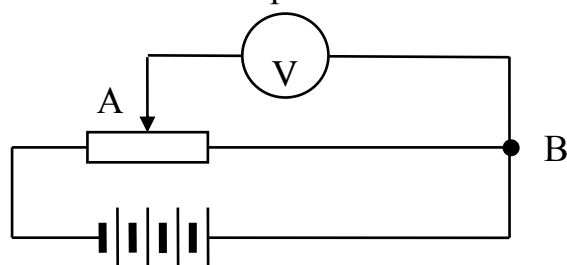
$$A_2 = -i_2 \varepsilon_2 = -1,78 \text{ Дж.}$$

Легко видеть, что суммарная работа, совершаемая первым и третьим элементами, равна сумме количества теплоты, выделяющейся во всей цепи, и работы, совершаемой против стороннего поля второго элемента, то есть

$$A_1 + A_3 = -A_2 + Q.$$

Пример 4. Потенциометр с сопротивлением  $R=100$  Ом подключен к батарее, ЭДС которой  $\varepsilon = 150$  В и внутренним сопротивлением  $R_i = 50$  Ом. Определить: 1) показание вольтметра с сопротивлением  $R_V = 500$  Ом, соединенного с одной из клемм потенциометра и подвижным контактом, установленным посередине потенциометра; 2) разность потенциалов между теми же точками потенциометра при отключении вольтметра.

1. Показание вольтметра, подключенного к точкам А



и В (рис. 3.1.3), определим по формуле

Рис. 3.1.3

$$U_1 = I_1 R_1, \quad (1)$$

где  $R_1$  - сопротивление параллельно соединенных вольтметра и половины потенциометра;

$I_1$  - суммарная сила тока в ветвях этого соединения (она равна силе тока в неразветвленной части цепи).

Силу тока  $I_1$  найдем по закону Ома для полной цепи.

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_e + R_i}, \quad (2)$$

где  $R_e$  - сопротивление внешней цепи.

Это сопротивление есть сумма двух сопротивлений.

$$R_e = \frac{R}{2} + R_1. \quad (3)$$

Сопротивление  $R_1$  найдем по формуле параллельного соединения

проводников  $\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R/2}$ , откуда

$$R_1 = \frac{R \cdot R_v}{R + 2R_v} \quad (4)$$

Подставив в (2) выражение  $R_e$  по (3), найдем

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R/2 + R_1 + R_i}. \quad (5)$$

В данном случае решение задачи в общем виде было бы громоздким.

Поэтому удобно вычисления величин провести отдельно.

$$R_i = \frac{100 \cdot 500}{100 + 2 \cdot 500} = 45,5 \text{ Ом.}$$

$$I_1 = \frac{150}{50 + 45,5 + 50} = 1,03 \text{ А.}$$

$$U_1 = 1,03 \cdot 45 \cdot 5 = 46,9 \text{ В}$$

2. Разность потенциалов между точками А и В при отключенном вольтметре равна произведению силы тока  $I_2$  на половину сопротивления потенциометра.

$$U_2 = I_2 \cdot \frac{R}{2}, \quad (6)$$

где  $I_2$  - сила тока в цепи при отключенном вольтметре. Ее определим по формуле

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R + R_i}.$$

Подставив выражение  $I_2$  в (6), найдем

$$U_2 = \frac{\varepsilon}{R + R_i} \cdot \frac{R}{2}.$$

Произведем вычисления.

$$U_2 = \frac{150}{100 + 50} \cdot \frac{100}{2} = 50 \text{ В.}$$

Пример 5. При включении электромотора в сеть с напряжением  $U=220$  В он потребляет ток  $I=4$  А. Определить мощность, потребляемую мотором, и его к.п.д., если сопротивление обмотки мотора  $R=8$  Ом.

Дано:

$$U=220 \text{ В}$$

$$I=4 \text{ А}$$

$$R=8 \text{ Ом}$$

$$P=? \quad \eta=?$$

Решение.

Определим мощность, потребляемую электромотором.

$$P = U \cdot I = 220 \cdot 4 = 880 \text{ Вт.}$$

Определим падение напряжения на обмотке мотора.

$$U_1 = I \cdot R = 4 \cdot 8 = 32 \text{ В.}$$

Определим мощность, потребляемую на нагрев обмотки.

$$P_1 = U_1 \cdot I = 32 \cdot 4 = 128 \text{ Вт.}$$

Определим к.п.д. мотора по формуле  $\eta = \frac{P - P_1}{P}$ .

$$\eta = \frac{880 - 128}{880} = 0,85.$$

Ответ:  $P = 880$  Вт;  $\eta = 85\%$ .

Пример 6. ЭДС батареи  $\varepsilon = 12$  В. При силе тока  $I = 3$  А к.п.д. батареи  $\eta = 0,6$ . Определить внутреннее сопротивление  $r$  батареи.

Дано:	Решение.
$\varepsilon = 12$ В	К.п.д. есть отношение полезной мощности к полной.
$I = 3$ А	$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P}$
$\eta = 0,6$	Мощность полезная $P_{\text{полезн}} = I \cdot U$ .
$r = ?$	Полная мощность $P = \varepsilon \cdot I$ .

Подставим

$$\eta = \frac{I \cdot U}{\varepsilon \cdot I} = \frac{U}{\varepsilon}, \text{ откуда}$$

$$U = \eta \cdot \varepsilon.$$

Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Выразим внутреннее сопротивление.

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - R.$$

Сопротивление

$$R = \frac{U}{I}.$$

Так как  $U = \eta \cdot \varepsilon$ , то  $R = \frac{\eta \cdot \varepsilon}{I}$ .

Отсюда

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - \frac{\eta \cdot \varepsilon}{I} = \frac{\varepsilon}{I} \cdot (1 - \eta).$$

Произведем вычисления.

$$r = \frac{12}{3} \cdot (1 - 0,6) = 1,6 \text{ Ом}$$

Ответ:  $r = 1,6$  Ом



## Задачи для самостоятельного решения

1. На концах медного провода длиной  $l=5$  м поддерживается напряжение  $U=1$  В. Определить плотность тока  $j$  в проводе.

Ответ:  $1,18 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>

2. Резистор сопротивлением  $R_1=5$  Ом, вольтметр и источник тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение  $U_1=10$  В. Если заменить резистор другим с сопротивлением  $R_2=12$  Ом, то вольтметр покажет напряжение  $U_2=12$  В. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока. Током через вольтметр пренебречь.

Ответ: 14 В; 2 Ом

3. Определить электрический заряд, прошедший через поперечное сечение провода сопротивлением  $R=3$  Ом при равномерном нарастании напряжения на концах провода от  $U_1=2$  В до  $U_2=4$  В в течение  $t=20$  с.

Ответ: 20 Кл

4. Определить силу тока в цепи, состоящей из двух элементов с ЭДС  $\varepsilon_1=1,6$  В и  $\varepsilon_2=1,2$  В и внутренними сопротивлениями  $R_1=0,6$  Ом и  $R_2=0,4$  Ом.

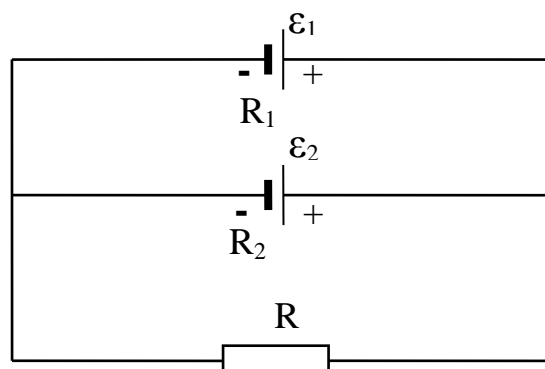
Ответ: 0,4 А

5. Три батареи с ЭДС  $\varepsilon_1=8$  В,  $\varepsilon_2=3$  В и  $\varepsilon_3=4$  В и внутренними сопротивлениями  $R_1=0,6$  Ом каждое соединены одноименными полюсами. Пренебрегая сопротивлением соединительных проводов, определить силы токов, идущих через батареи.

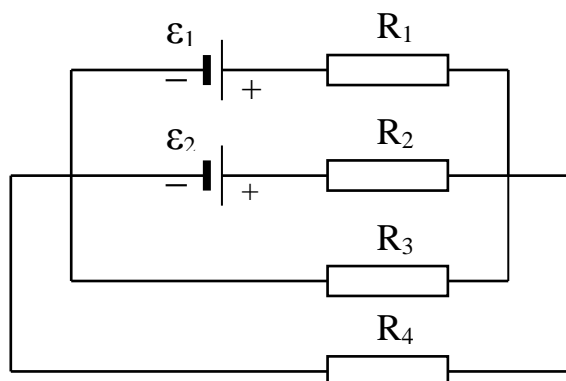
Ответ: 1,5 А; 1 А; 0,5 А

6. Определить напряжение  $U$  на зажимах реостата сопротивлением  $R$ , включенного в цепь, как показано на рисунке, если  $\varepsilon_1=5$  В,  $R_1=1$  Ом,  $\varepsilon_2=3$  В,  $R_2=0,5$  Ом,  $R=3$  Ом.

Ответ: 3,3 В



7. Определить напряжение на резисторах сопротивлениями  $R_1=2$  Ом,  $R_2=R_3=4$  Ом и  $R_4=2$  Ом, включенных в цепь, как показано на рисунке, если  $\varepsilon_1=10$  В,  $\varepsilon_2=4$  В. Сопротивлениями источников тока пренебречь.



Ответ: 6 В; 0; 4 В; 4 В

#### Задачи к контрольной работе

301. Катушка и амперметр соединены последовательно и подключены к источнику тока. К клеммам катушки присоединен вольтметр с сопротивлением  $r = 4$  кОм. Амперметр показывает силу тока  $I=0,3$  А, вольтметр – напряжение  $U = 120$  В. Определить сопротивление  $R$  катушки. Определить относительную погрешность  $\varepsilon$ , которая будет допущена при измерении сопротивления, если пренебречь силой тока, текущего через вольтметр.

302. ЭДС батареи  $\varepsilon = 80$  В, внутреннее сопротивление  $r = 5$  Ом. Внешняя цепь потребляет мощность  $P = 80$  Вт. Определить силу тока  $I$  в цепи, напряжение  $U$ , под которым находится внешняя цепь, и ее сопротивление  $R$ .

303. От батареи, ЭДС которой  $\varepsilon = 600$  В, требуется передать энергию на расстояние  $l = 1$  км. Потребляемая мощность  $P = 5$  кВт. Найти минимальные потери мощности в сети, если диаметр медных подводящих проводов  $d=0,5$  см.

304. При внешнем сопротивлении  $R_1=8$  Ом сила тока в цепи  $I_1=0,8$  А, при сопротивлении  $R_2=15$  Ом сила тока  $I_2=0,5$  А. Определить силу тока  $I_{к.з.}$  короткого замыкания источника ЭДС.

305. ЭДС батареи  $\varepsilon = 30$  В. Наибольшая сила тока, которую может дать батарея,  $I_{\max} = 10$  А. Определить максимальную мощность  $P_{\max}$ , которая может выделяться во внешней цепи.

306. Аккумулятор с ЭДС  $\varepsilon = 12$  В заряжается от сети постоянного тока с напряжением  $U = 15$  В. Определить напряжение на клеммах аккумулятора, если его внутреннее сопротивление  $r = 10$  Ом.

307. От источника с напряжением  $U = 800$  В необходимо передать потребителю мощность  $P = 10$  кВт на некоторое расстояние. Какое наибольшее сопротивление может иметь линия передачи, чтобы потери энергии в ней не превышали 10% от передаваемой мощности?

308. При включении электромотора в сеть с напряжением  $U = 220$  В он потребляет ток  $I=6$  А. Определить мощность, потребляемую мотором, и его к.п.д., если сопротивление  $R$  обмотки мотора равно 6 Ом.

309. В сеть с напряжением  $U = 100$  В подключили катушку с сопротивлением  $R_1 = 2$  кОм и вольтметр, соединенные последовательно. Показание вольтметра  $U_1= 80$  В. Когда катушку заменили другой, вольтметр показал  $U_2= 60$  В. Определить сопротивление  $R_2$  другой катушки.

310. ЭДС батареи  $\varepsilon = 24$  В. При силе тока  $I=6$  А к.п.д. батареи  $\eta = 0,65$ . Определить внутреннее сопротивление  $r$  батареи.

311. За время  $t = 20$  с при равномерно возрастающей силе тока от нуля до некоторого максимума в проводнике сопротивлением  $R=5$  Ом выделилось количество теплоты  $Q = 4$  кДж. Определить скорость нарастания силы тока, если сопротивление проводника  $R= 5$  Ом.

312. Сила тока в проводнике изменяется со временем по закону  $I = I_0 e^{-\alpha t}$ , где  $I_0=20$  А,  $\alpha = 10^2$  с<sup>-1</sup>. Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за время  $t = 10^{-2}$  с.

313. Сила тока в проводнике сопротивлением  $R=10$  Ом за время  $t=50$  с равномерно нарастает от  $I_1=5$  А до  $I_2=10$  А. Определить количество теплоты  $Q$ , выделившееся за это время в проводнике.

314. В проводнике за время  $t=10$  с при равномерном возрастании силы тока от  $I_1=1$  А до  $I_2=2$  А выделилось количество теплоты  $Q = 5$  кДж. Найти сопротивление  $R$  проводника.

315. Сила тока в проводнике изменяется со временем по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ . Найти заряд  $q$ , проходящий через поперечное сечение проводника за время  $t$ , равное половине периода  $T$ , если начальная сила тока  $I_0=10$  А, циклическая частота  $\omega=50\pi$  с<sup>-1</sup>.

316. За время  $t = 10$  с при равномерно возрастающей силе тока от нуля до некоторого максимума в проводнике выделилось количество теплоты  $Q = 40$  кДж. Определить среднюю силу тока  $\langle I \rangle$  в проводнике, если его сопротивление  $R = 25$  Ом.

317. За время  $t = 8$  с при равномерно возрастающей силе тока в проводнике сопротивлением  $R=8$  Ом выделилось количество теплоты  $Q = 500$  кДж. Определить заряд  $q$ , проходящий в проводнике, если сила тока в начальный момент времени равна нулю.

318. Определить количество теплоты  $Q$ , выделившееся за время  $t=10$  с в проводнике сопротивлением  $R=10$  Ом, если сила тока в нем, равномерно уменьшаясь, изменилась от  $I_1=10$  А до  $I_2=0$ .

319. Сила тока в цепи изменяется по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ . Определить количество теплоты, которое выделится в проводнике сопротивлением  $R=10$  Ом за время, равное четверти периода (от  $t_1=0$  до  $t_2=T/4$ , где  $T=10$  с).

320. Сила тока в цепи изменяется со временем по закону  $I = I_0 e^{-\alpha t}$ . Определить количество теплоты, которое выделится в проводнике с сопротивлением  $R=20$  Ом за время, в течение которого ток уменьшится в  $e$  раз. Коэффициент  $\alpha$  принять равным  $2 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>.

## 3.2 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### Основные формулы

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (закон Ампера)

$$\vec{F} = I[\vec{\lambda} \cdot \vec{B}] \quad , \quad \text{или} \quad F = IB\lambda \sin \alpha \quad ,$$

где  $\lambda$  - длина проводника;

$B$  – магнитная индукция;

$\alpha$  - угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Если поле неоднородно и проводник не является прямым, закон Ампера применяется к каждому элементу проводника.

$$d\vec{F} = I[d\vec{\lambda} \cdot \vec{B}] \quad , \quad dF = IBd\lambda \sin \alpha \quad .$$

Магнитная индукция  $\vec{B}$  и напряженность  $\vec{H}$  связаны друг с другом

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

где  $\mu$  – магнитная проницаемость изотропной среды (для вакуума  $\mu=1$ );  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Силы взаимодействия параллельных проводников длины  $\lambda$  с током

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 \cdot I_2 \lambda}{2\pi d} \quad ,$$

где  $d$  - расстояние между проводниками .

Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} [d\vec{\lambda} \cdot \vec{r}] \cdot \frac{I}{r^3} \quad , \quad \text{или} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\lambda \sin \alpha}{r^2} \quad ,$$

где  $dB$  – магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника длиной  $\lambda$  с током  $I$ ;

$\vec{r}$  - радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция;

$\alpha$  – угол между радиус-вектором и направлением тока в элементе

проводника.

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \text{ - магнитная индукция поля в центре кругового тока радиуса } R.$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \text{ - магнитная индукция поля на оси кругового тока в точке, находящейся на расстоянии } h \text{ от центра витка.}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} \text{ - магнитная индукция поля прямого тока в точке, находящейся на расстоянии } r \text{ от оси проводника.}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \text{ - магнитная индукция поля, создаваемого отрезком проводника с током (рис.3.2.1).}$$

⊙ - означает, что вектор  $\vec{B}$  направлен перпендикулярно плоскости чертежа к нам.

Если концы проводника симметричны относительно точки, в которой определяется  $\vec{B}$ , то

$$-\cos\alpha_2 = \cos\alpha_1 = \cos\alpha \text{ и}$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r} \cdot \cos\alpha .$$

Сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] \text{ , или}$$

$$F = qvB \sin\alpha ,$$

где  $q$  - заряд;

$v$  - скорость частицы;

$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Для соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI ,$$

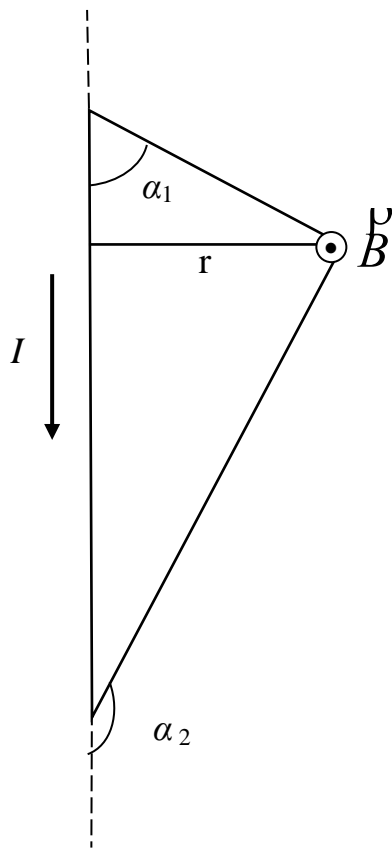


Рис. 3.2.1

где  $n$  – отношение числа витков соленоида к его длине.

Магнитный момент плоского контура с током

$$\vec{P}_m = nIS \vec{n},$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор положительной нормали к плоскости контура;

$S$  – площадь контура.

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

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}], \quad \text{или}$$

$$M = P_m B \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$ .

Магнитный поток однородного магнитного поля через плоскую поверхность  $S$

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad \text{или}$$

$$\Phi = B_n S$$

где  $S$  – площадь контура;

$\alpha$  – угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции.

Магнитный поток неоднородного поля через произвольную поверхность

$$\Phi = \int_S B_n dS - \text{интегрирование по всей поверхности.}$$

Потокоцепление (полный поток)

$$\psi = N \cdot \Phi \quad (\text{для соленоида и тороида с равномерной}$$

намоткой плотно прилегающих друг к другу  $N$  витков).

Работа по перемещению замкнутого контура в магнитном поле

$$A = I \cdot d\Phi$$

ЭДС индукции (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = - \frac{d\psi}{dt};$$

при  $N=1$

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

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

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

где  $\lambda$  - длина проводника;

$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

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

$$Q = \frac{\Delta\Phi}{R}, \quad \text{или}$$

$$Q = \frac{N\Delta\Phi}{R} = \frac{\Delta\Psi}{R},$$

где  $R$  – сопротивление контура.

Индуктивность контура

$$L = \frac{\Phi}{I},$$

где  $\Phi$  - магнитный поток.

ЭДС самоиндукции

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

Индуктивность соленоида

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

где  $n$  – отношение числа витков соленоида к его длине;

$V$  – объем соленоида.

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

при замыкании цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right);$$

при размыкании цепи

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

где  $\varepsilon$  - ЭДС источника тока;



$t$ - время с момента замыкания (размыкания);

$I_0$  = сила тока в цепи при  $t=0$ .

Энергия магнитного поля

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

Объемная плотность энергии магнитного поля (отношение энергии магнитного поля к его объему)

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

где  $B$  – магнитная индукция;

$H$  – напряженность поля.

#### Пример решения задач

Пример 1. По длинному прямому тонкому проводу течет ток силой  $I=20$  А. Определить магнитную индукцию  $\vec{B}$  поля, создаваемого проводником в точке, удаленной от него на расстояние  $r = 4$  см.

Магнитное поле, создаваемое прямым бесконечно длинным проводником ничтожно малого сечения, обладает осевой симметрией. Это значит, что модуль вектора магнитной индукции в данной точке будет зависеть только от ее расстояния до проводника.

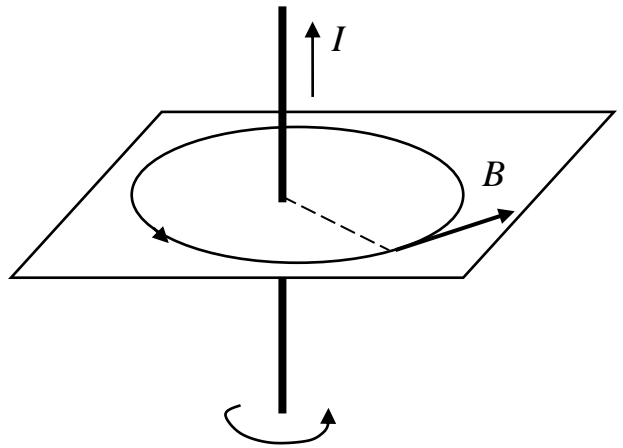


Рис. 3.2.2

Поэтому все точки на окружности радиусом  $r$  (рис. 3.2.2), лежащей в плоскости, перпендикулярной проводнику, будут характеризоваться одинаковой по модулю магнитной индукцией

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

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Окружность на рисунке 3.2.2 является магнитной силовой линией. Ее направление (а значит, и направление вектора  $\vec{B}$ ) определяется по правилу буравчика (правого винта).

Произведем вычисления.

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{20}{2\pi \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = 10^{-4} \text{ Тл} = 0,1 \text{ мТл}$$

Ответ:  $B=0,1 \text{ мТл}$

Пример 2. Два параллельных бесконечно длинных провода D и C, по которым текут в одном направлении электрические токи силой  $I=60 \text{ А}$ , расположены на расстоянии  $d=10 \text{ см}$  друг от друга. Определить магнитную индукцию  $\vec{B}$  поля, создаваемого проводниками с током в точке A (рис. 3.2.3), отстоящей от оси одного проводника на расстоянии  $r_1 = 5 \text{ см}$ , от другого –  $r_2 = 12 \text{ см}$ .

Для нахождения магнитной индукции  $\vec{B}$  в точке A воспользуемся принципом суперпозиции магнитных полей. Для этого определим направления магнитных индукций  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$

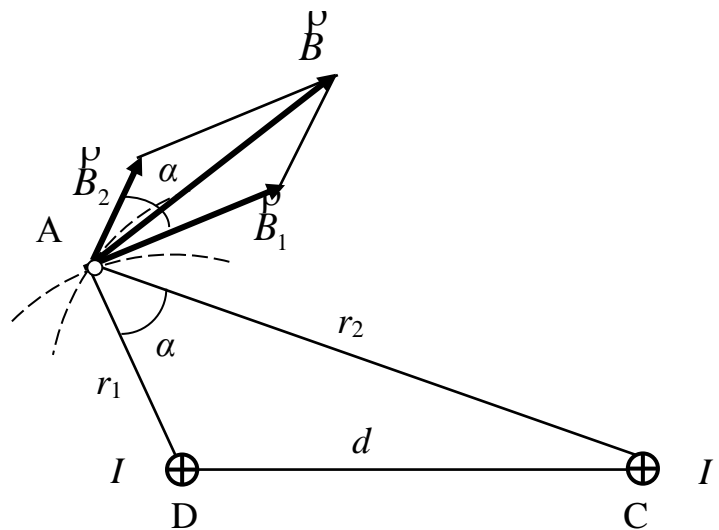


Рис. 3.2.3

полей, создаваемых каждым проводником с током в отдельности, и сложим их геометрически.

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

Модуль вектора  $\vec{B}$  может быть найден по формуле векторной алгебры.

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

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ .

Магнитные индукции  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  выражаются соответственно через силу тока  $I$  и расстояния  $r_1$  и  $r_2$  от проводов до точки А.

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

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Подставляя выражения  $B_1$  и  $B_2$  в формулу, по которой вычисляется  $B$ , и вынося  $\frac{\mu_0 I}{2\pi}$  за знак корня, получаем

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

Вычислим  $\cos \alpha$ . Заметив, что  $\alpha = \sphericalangle DAC$  (как углы с соответственно перпендикулярными сторонами), по теореме косинусов запишем

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

где  $d$  – расстояние между проводами.

Отсюда

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

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

Подставив в формулу, по которой вычисляется  $B$ , числовые значения физических величин, получим

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{1}{(0,05)^2} + \frac{1}{(0,12)^2} + \frac{2}{0,05 \cdot 0,12} \cdot \frac{23}{40}} = 3,08 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} = 308 \text{ мкТл}$$

Ответ:  $B = 308$  мкТл

Пример 3. По проводнику, согнутому в виде прямоугольника со сторонами  $a = 4$  см и  $b = 12$  см, течет ток силой  $I = 80$  А. Определить напряженность  $\vec{H}$  и индукцию  $\vec{B}$  магнитного поля в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

Дано:

$$a = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$b = 12 \text{ см} = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Решение

По принципу суперпозиции магнитных полей магнитная индукция  $\vec{B}$  будет равна геометрической

$I=80 \text{ A}$  \_\_\_\_\_ сумме магнитных индукций полей, создаваемых

$\vec{H}=?$   $\vec{B}=?$

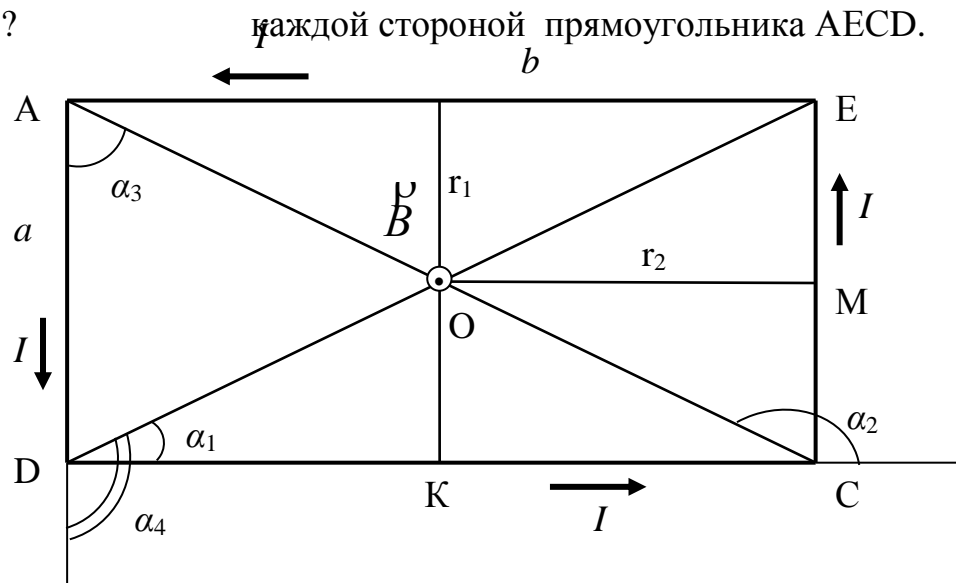


Рис. 3.2.4

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 .$$

В точке O все  $\vec{B}$  направлены одинаково (к нам), перпендикулярно плоскости витка.

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_1} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2);$$

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1; \quad \cos\alpha_2 = -\cos\alpha_1.$$

$$\mu = 1, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1} \cos\alpha_1 .$$

$$r_1 = a/2, \quad r_2 = b/2 .$$

Диагонали прямоугольника делятся в точке пересечения пополам, поэтому вычислим  $\cos\alpha_1$  из соотношения

$$\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \cdot \cos\alpha_1 = \frac{b}{2} \quad (\Delta DOK)$$

$$\cos\alpha_1 = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}};$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I b}{2\pi \frac{a}{2} \sqrt{a^2 + b^2}} .$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_2} (\cos \alpha_3 - \cos \alpha_4);$$

$$\alpha_3 = 90^\circ - \alpha_1; \quad \alpha_4 = 180^\circ - \alpha_3; \quad \cos \alpha_3 = \sin \alpha_1; \quad \cos \alpha_4 = -\cos \alpha_3.$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_2} (\cos \alpha_3 + \cos \alpha_3) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2} \cos \alpha_3.$$

Из  $\Delta EOM$

$$\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2} \cdot \cos \alpha_3 = \frac{a}{2} . \quad \cos \alpha_3 = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} ;$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I a}{2\pi \frac{b}{2} \sqrt{a^2 + b^2}} .$$

$$B = 2B_1 + 2B_2 = 2 \frac{\mu_0 I}{\pi \sqrt{a^2 + b^2}} \cdot \left( \frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right) = 2 \frac{\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{a^2 + b^2}{ab \sqrt{a^2 + b^2}} = 2 \frac{\mu_0 I \sqrt{a^2 + b^2}}{\pi ab} .$$

Определим размерность полученной величины.

$$[B] = \frac{[\mu_0][I][\sqrt{a^2 + b^2}]}{[a][b]} .$$

$$\frac{1 \text{ Гн} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А} / 1 \text{ с} \cdot 1 \text{ м}} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м} = \frac{1 \text{ Дж} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ Кл} \cdot (1 \text{ А} / 1 \text{ с}) \cdot 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ м}} = \frac{1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ м}^2} = \frac{1 \text{ н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \text{ Тл}$$

1 Тл - единица измерения магнитной индукции.

$$B = 2 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot \sqrt{4^2 + 12^2} \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 12 \cdot 10^{-2}} = \frac{40}{3} \cdot 4\sqrt{10} \cdot 10^{-5} = \frac{160}{3} \cdot 3,162 \cdot 10^{-5} = 168 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

$$H = \frac{B}{\mu \mu_0} = \frac{168 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 13,37 \cdot 10^2 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Направление  $\vec{H}$  совпадает с направлением  $\vec{B}$ .

Пример 4. Ток силой  $I=100$  А течет по проводнику, согнутому под прямым углом. Найти напряженность  $H$  магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии  $b=40$  см. Считать, что оба конца проводника находятся очень далеко от вершины угла.

Дано:

$$I=100 \text{ А}$$

$$b=40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}$$

$$H=?$$

Решение

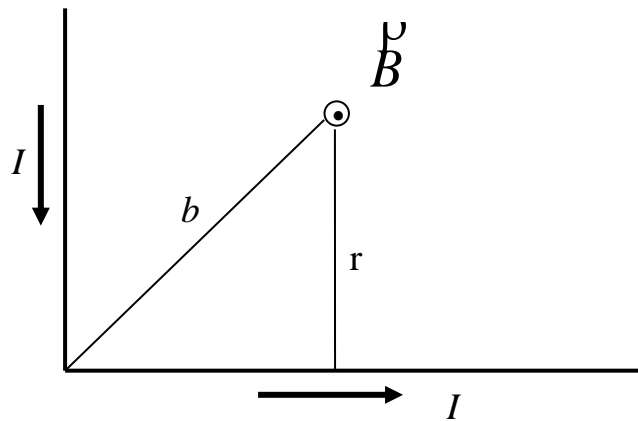


Рис. 3.2.5

Используем формулу  $B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$ ,  $\mu = 1$ .

Вектор индукции  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости чертежа, направлен к нам, поэтому изображен точкой. Углы  $\alpha_1 = \frac{\pi}{4}$ ,  $\alpha_2 = \pi$ , так как концы проводника находятся очень далеко от вершины угла. Из-за симметрии проводника

$$B = 2 \cdot \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right).$$

$$\cos\alpha_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad \cos\alpha_2 = -1. \quad r = b \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Находим  $H$ .

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi r} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) = \frac{I}{2\pi b} (\sqrt{2} + 1).$$

Подставляем величины.

$$H = \frac{100(\sqrt{2} + 1)}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4} = 96,1 \text{ А/м}$$

Ответ:  $H=96,1 \text{ А/м}$

Пример 5. По трем параллельным прямым проводникам, находящимся на одинаковом расстоянии  $d = 30 \text{ см}$  друг от друга, текут токи одинаковой силы  $I = 300 \text{ А}$ . В двух проводниках направления токов совпадают. Вычислить для каждого проводника отношение силы, действующей на него, к его длине.

Дано:

$$I_1 = I_2 = I_3 = 300 \text{ А}$$

$$d = 30 \text{ см} = 30 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$\frac{F_1}{\lambda} = ? \quad \frac{F_2}{\lambda} = ? \quad \frac{F_3}{\lambda} = ?$$

Решение

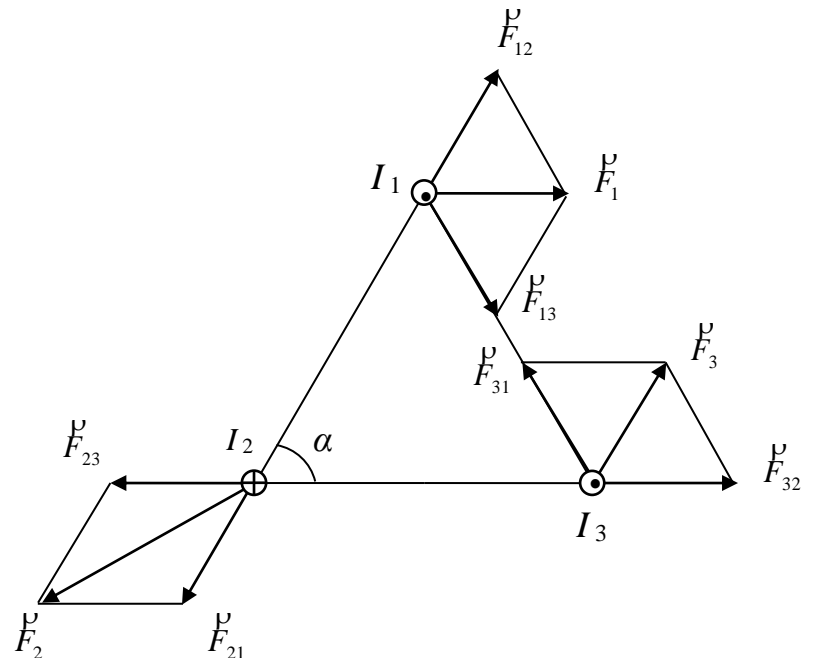


Рис.3.2.6

Пусть  $I_1$  и  $I_3$  направлены перпендикулярно к плоскости чертежа и к нам, а  $I_2$  – от нас. На любой из проводников действуют магнитные поля двух других. Проводники с разнонаправленными токами отталкиваются друг от друга, с одинаково направленными – притягиваются.

Силы, действующие на проводник с током  $I_2$ ,

$$F_{21} = \frac{\mu\mu_0 I_2 I_1 \lambda}{2\pi d} ; \quad F_{23} = \frac{\mu\mu_0 I_2 I_3 \lambda}{2\pi d} .$$

Направления этих сил показаны на рисунке 3.2.6.

Результирующую силу находим по теореме косинусов.

$$F_2^2 = F_{21}^2 + F_{23}^2 - 2F_{21}F_{23} \cos(180^\circ - \alpha).$$

$$\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha.$$

$$F_2 = \sqrt{F_{21}^2 + F_{23}^2 + 2F_{21}F_{23} \cos \alpha} = \frac{\mu \mu_0 I_2 \lambda}{2\pi d} \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + 2I_1 \cdot I_3 \cdot \cos \alpha}.$$

$\mu = 1$  по условию задачи.

$$\frac{F_2}{\lambda} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + 2I_1 \cdot I_3 \cdot \cos \alpha};$$

$$\frac{F_2}{\lambda} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 300}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^{-2}} \cdot \sqrt{300^2 + 300^2 + 2 \cdot 300^2 \cdot \frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 300^2 \cdot \sqrt{3}}{30 \cdot 10^{-2}} = 0,1032 \text{ Н.}$$

$$F_3 = \sqrt{F_{32}^2 + F_{31}^2 - 2F_{32}F_{31} \cos \alpha} = \frac{\mu \mu_0 I_3 \lambda}{2\pi d} \sqrt{I_2^2 + I_1^2 - 2I_2 \cdot I_1 \cdot \cos \alpha};$$

$$\frac{F_3}{\lambda} = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi d} \sqrt{I_2^2 + I_1^2 - 2I_2 \cdot I_1 \cdot \cos \alpha};$$

$$\frac{F_3}{\lambda} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 300^2}{2\pi \cdot 30 \cdot 10^{-2}} \cdot \sqrt{1 + 1 - 2 \cdot \frac{1}{2}} = 0,06 \text{ Н.}$$

$$\frac{F_1}{\lambda} = \frac{F_3}{\lambda}.$$

На единицу длины первого и третьего проводников действует сила 0,06 Н, на единицу длины второго проводника действует сила 0,1 Н.

Пример 6. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл под углом  $\alpha = 60^\circ$  к направлению линии индукции. Определить момент импульса  $L$  частицы при движении в магнитном поле, если радиус траектории частицы  $R=1$  мм.

Дано:

$$B = 0,3 \text{ Тл}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$R = 1 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$L = ?$$

Решение

На заряд  $e$ , движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца, численно равная  $F = eBv \sin \alpha$ .

Движение частицы подчиняется второму закону Ньютона

$$ma = F.$$

$$m \frac{v^2}{R} = eBv \sin \alpha,$$

где  $\frac{v^2}{R}$  - центростремительное ускорение, полученное заряженной частицей.

$$mv = eBR \sin \alpha.$$



Момент импульса  $L = Rm v = R^2 e B \sin \alpha$ .

Проверим размерность  $[L] = [R^2][e][B]$ .

$$1\text{м}^2 \cdot 1\text{Кл} \cdot \frac{1\text{Н}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}} = \frac{1\text{м}^2 \cdot 1\text{А} \cdot 1\text{с} \cdot 1\text{Н}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}} = \frac{1\text{м} \cdot 1\text{с} \cdot 1\text{кг} \cdot 1\text{м}}{1\text{с}^2} = \frac{1\text{кг} \cdot 1\text{м}^2}{1\text{с}}; \quad [L] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}.$$

$$L = (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,41 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}. \text{ Ответ: } L = 0,41 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}$$

Пример 7. Напряженность  $H$  магнитного поля в центре кругового тока равна  $300 \text{ А/м}$ . Магнитный момент витка  $P_m = 18 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . Вычислить силу тока  $I$  в витке и радиус  $R$  витка.

Дано:

$$H = 300 \text{ А/м}$$

$$P_m = 18 \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

$$I = ? \quad R = ?$$

Решение

Индукция  $B$  поля кругового тока в центре его

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

Напряженность

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

Магнитный момент

$$P_m = I \cdot s = I \pi R^2.$$

Решаем уравнения.

$$H = \frac{I}{2R}$$

$$P_m = I \pi R^2$$

$$I = H \cdot 2R$$

$$P_m = H \cdot 2R \pi R^2 = 2H \pi R^3$$

$$R^3 = \frac{P_m}{2\pi H};$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{P_m}{2\pi H}}.$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{18}{2 \cdot 3,14 \cdot 300}} = \sqrt[3]{0,00955} = 10^{-1} \cdot \sqrt[3]{9,55} = 2,12 \cdot 10^{-1} = 0,212 \text{ м}.$$

$$I = H \cdot 2R = 300 \cdot 2 \cdot 0,212 = 127,2 \text{ А}.$$

Ответ:  $R = 0,212 \text{ м}$ ;  $I = 127,2 \text{ А}$

Пример 8. Прямой проводник длиной  $\ell = 60 \text{ см}$ , по которому течет ток силой  $I = 200 \text{ А}$ , движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$ . Какую работу  $A$  совершат силы, действующие на проводник со стороны поля, переместив его на расстояние  $s = 50 \text{ см}$ , если направление перемещения перпендикулярно линиям индукции и проводнику?

Дано:

Решение

$I=200 \text{ А}$

$B= 0,3 \text{ Тл}$

$\ell =60 \text{ см}=0,6 \text{ м}$

$s = 50 \text{ см}=0,5 \text{ м}$

$A=?$

На проводник действует сила, определяемая законом Ампера. Она направлена перпендикулярно линиям индукции и проводнику, следовательно, направление перемещения проводника совпадает с направлением силы.

$$A = F \cdot s , \quad \cos \alpha = 1.$$

$$A = IB\lambda \sin \alpha_1 \cdot s = 200 \cdot 0,1 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 0,5 = 6 \text{ Дж} , \quad \text{или}$$

$$A = I \cdot \Delta \Phi , \quad \Delta \Phi = B \cdot \Delta s .$$

$$A = IB\lambda s = 200 \cdot 0,1 \cdot 0,6 \cdot 0,5 = 6 \text{ Дж}.$$

Ответ:  $A=6 \text{ Дж}$

Пример 9. Виток, в котором поддерживается постоянная сила тока  $I=50 \text{ А}$ , свободно устанавливается в однородном магнитном поле  $B= 30 \text{ мТл}$ . Диаметр витка  $d =20 \text{ см}$ . Какую работу  $A$  нужно совершить для того, чтобы повернуть виток относительно оси, совпадающей с диаметром, на угол  $\alpha = 60^\circ$  ?

Дано:

Решение

$I=50 \text{ А}$

$B= 30 \text{ мТл}=30 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$

$d =20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$

$\alpha = 60^\circ$

$A=?$

Работа внешних сил по перемещению внешнего контура с током в магнитном поле определяется по формуле

$$A = I \cdot \Delta \Phi = I \cdot (\Phi_1 - \Phi_2),$$

где  $\Phi_1$  – магнитный поток, пронизывающий виток до поворота;

$\Phi_2$  – магнитный поток, пронизывающий виток после поворота.

$$A = IBs(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - значение углов, которые составляют нормаль с направлением линий индукции соответственно до и после поворота (до поворота  $\alpha_1=0$ , так как виток свободно установился в магнитном поле,  $\alpha_2 =60^\circ$ );

$B$  - индуктивность магнитного поля;

$$s = \pi R^2 = \frac{\pi d^2}{4}, \quad \text{где } d - \text{ диаметр витка.}$$

$$A = IB \frac{\pi d^2}{4} (\cos 0^\circ - \cos 60^\circ);$$

$$A = \frac{50 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 0,2^2}{4} (1 - 0,5) = 23,55 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Можно решить задачу иным путем. Момент силы, действующей на виток в магнитном поле,

$$M = P_m B \sin \alpha = IsB \sin \alpha,$$

где  $P_m = I \cdot s$  - магнитный момент витка.

При  $t=0$  момент силы равен нулю, а значит  $\alpha = 0$ .

$$dA = M \cdot d\alpha; \quad dA = IsB \sin \alpha \cdot d\alpha.$$

$$A = IBs \int_0^\alpha \sin \alpha \cdot d\alpha = IBs (-\cos \alpha) \Big|_0^\alpha = IBs (-\cos 60^\circ + \cos 0^\circ) =$$

$$= \frac{50 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot \frac{1}{2} = 23,55 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$$

Ответ:  $A=23,55 \cdot 10^{-3}$  Дж

Пример 10. Рамка площадью  $s=200 \text{ см}^2$  равномерно вращается с частотой  $n=5 \text{ с}^{-1}$  относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям индукции однородного магнитного поля ( $B=1 \text{ Тл}$ ).

Определить среднее значение ЭДС индукции  $\langle \varepsilon_i \rangle$  за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения.

Дано:

$$s=200 \text{ см}^2=200 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$n=5 \text{ с}^{-1}$$

$$B=1 \text{ Тл}$$

Решение

По формуле  $\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt}$  при  $N=1$

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

За промежуток  $\Delta t$  среднее значение скорости

$$\langle \mathcal{E}_i \rangle = ?$$

изменения магнитного потока

$$\langle \mathcal{E}_i \rangle = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

Знак « - » опускаем, так как направление ЭДС нас не интересует.

$$\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 ,$$

где  $\Phi_1=0$  – минимальное значение магнитного потока;

$\Phi_2$  – максимальное значение магнитного потока.

$$\Delta t = t_2 - t_1 .$$

В момент  $t_1$  магнитный поток

$$\Phi_1 = B \cdot s \cdot \cos \omega t_1 ,$$

где  $B$  – магнитная индукция;

$s$  – площадь рамки;

$\omega$  – круговая (или циклическая) частота.

$\Phi_1=0$ , значит

$$B \cdot s \cdot \cos \omega t_1 = 0 .$$

$$\cos \omega t_1 = 0, \quad \omega t_1 = \frac{\pi}{2}, \quad t_1 = \frac{\pi}{2\omega} .$$

$\Phi_2 = \Phi_{\max}$ , следовательно  $B \cdot s \cdot \cos \omega t_2$  имеет максимальное значение.

Это возможно при условии

$$\cos \omega t_2 = 1, \quad \omega t_2 = 0, \quad t_2 = 0 .$$

Значит

$$\Delta \Phi = B \cdot s, \quad \Delta t = \frac{\pi}{2\omega}, \quad \omega = 2\pi n,$$

где  $n$  – частота вращения.

Следовательно

$$\Delta t = \frac{1}{2n} .$$

Подставляем эти значения в формулу  $\langle \mathcal{E}_i \rangle = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ , получаем

$$\langle \mathcal{E}_i \rangle = 4nBs .$$

Проверим размерность.

$$[\langle \varepsilon_i \rangle] = [n][B][s] = 1c^{-1} \cdot 1Tл \cdot 1м^2 = 1c^{-1} \cdot \frac{1H}{1A \cdot 1м} \cdot 1м^2 = \frac{1H \cdot 1м}{1c \cdot 1A} = \frac{1Дж}{1Кл} = 1В$$

1 В – единица  $\varepsilon$ .

Вычисляем.

$$\langle \varepsilon_i \rangle = 4 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 200 \cdot 10^{-4} = 0,4 \text{ В}$$

Ответ:  $\langle \varepsilon_i \rangle = 0,4 \text{ В}$

Пример 11. В однородном магнитном поле с индукцией  $B=1,5 \text{ Тл}$  вращается с частотой  $n=30 \text{ с}^{-1}$  стержень длиной  $\ell=20 \text{ см}$ . Ось вращения параллельна линиям индукции и проходит через один из концов стержня перпендикулярно его оси. Определить разность потенциалов на концах стержня.

Дано:

$$B=1,5 \text{ Тл}$$

$$n=30 \text{ с}^{-1}$$

$$\ell=20 \text{ см}=0,2 \text{ м}$$

$$U=?$$

Решение

Индукцируемая разность потенциалов на концах стержня может быть определена по закону ЭДС индукции

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

За 1 секунду  $\Delta\Phi = Bs = B\pi\lambda^2 n$ , так как стержень описывает  $n$  раз окружность радиуса  $\ell$ .

$$U = \pi\lambda^2 nB = 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 30 \cdot 1,5 = 5,65 \text{ В}$$

$$[U] = [\lambda^2][n][B]. 1м^2 \cdot 1с^{-1} \cdot 1Тл = 1м^2 \cdot 1с^{-1} \cdot \frac{1H}{1A \cdot 1м} = \frac{1Дж}{1Кл} = 1В.$$

Ответ:  $U=5,65 \text{ В}$

Пример 12. По замкнутой цепи с сопротивлением  $R=40 \text{ Ом}$  течет ток. Через время  $t=24 \text{ мс}$  после размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 20 раз. Определить индуктивность  $L$  цепи.

Дано:

$$R=40 \text{ Ом}$$

$$t=24 \text{ мс}=24 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

Решение

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

$$L=? \quad \text{цепи находится по формуле } I = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{Rt}{L}}; \quad \frac{I_0}{I} = e^{\frac{Rt}{L}}.$$

Прологарифмируем последнее выражение.

$$\ln \frac{I_0}{I} = \frac{Rt}{L} \ln e; \quad \ln e = 1; \quad \ln \frac{I_0}{I} = \frac{Rt}{L}.$$

$$L = \frac{Rt}{\ln \frac{I_0}{I}} = \frac{40 \cdot 24 \cdot 10^{-3}}{2,995} = 0,32 \text{ Гн.}$$

Ответ:  $L=0,32$  Гн

Пример 13. Соленоид имеет железный, полностью размагниченный сердечник объемом  $V=600 \text{ см}^3$ . Напряженность  $H$  магнитного поля соленоида при силе тока  $I=0,9 \text{ А}$  равна  $1500 \text{ А/м}$ . Определить индуктивность соленоида.

Дано:

$$V=600 \text{ см}^3=6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$H=1500 \text{ А/м}$$

$$I=0,9 \text{ А}$$

$$L=?$$

Решение

Воспользуемся формулами энергии магнитного поля соленоида  $W = \frac{LI^2}{2}$  и  $W = wV$ ,

где  $w = \frac{BH}{2}$  - объемная плотность.

Подставляя объемную плотность  $w$  в формулу энергии магнитного поля соленоида  $W$ , получим  $W = \frac{BH}{2}V$ .

Приравниваем правые части выражений для энергии.

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{BH}{2}V; \quad L = \frac{BH}{I^2}V.$$

Определим  $B$  по графику (рис.3.2.7).

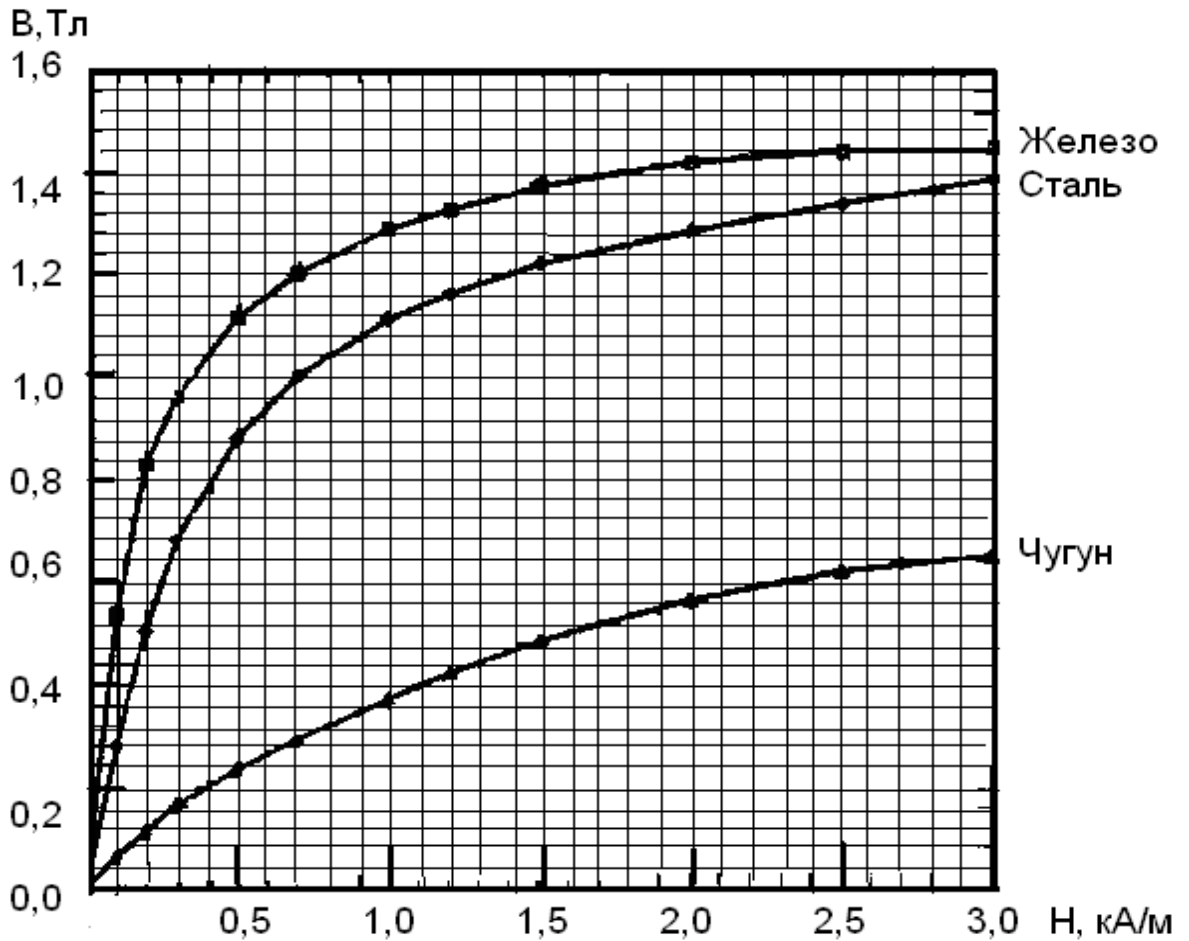


Рис. 3.2.7

$B=1,38$  Тл .

$$L = \frac{1,38 \cdot 1500 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}{0,81} = 1,53 \text{ Гн}$$

Можно решать иначе.

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

По условию задачи сердечник размагничен, следовательно, выполняется соотношение для изотропной среды.

$$B = \mu \mu_0 H ,$$

откуда

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

Магнитная индукция поля соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI .$$

Отсюда

$$n = \frac{B}{\mu\mu_0 I} .$$

Подставляя выражение  $n$  в формулу для определения  $L$ , получим

$$L = \mu\mu_0 \frac{B^2}{\mu^2 \mu_0^2 I^2} V = \frac{B^2}{\mu\mu_0 I^2} V .$$

Подставим  $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$ . Получим

$$L = \frac{B^2}{\frac{B}{\mu_0 H} \mu_0 I^2} V = \frac{BH}{I^2} V = 1,53 \text{ Гн}$$

Ответ:  $L=1,53 \text{ Гн}$

Пример 14. По проводнику, изогнутому в виде кольца радиусом  $R=30 \text{ см}$  и содержащему  $N=600$  витков, течет ток силой  $I=3 \text{ А}$ . Определить объемную плотность  $w$  энергии магнитного поля в центре кольца.

Дано:

$$R=30 \text{ см}=0,3 \text{ м}$$

$$N=600 \text{ витков}$$

$$I=3 \text{ А}$$

$$w = ?$$

Решение

Объемной плотностью  $w$  называется энергия в единице объема поля.

$$w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}; \quad w = \frac{\mu_0 H^2}{2} \text{ при } \mu=1.$$

В центре кольца

$$H = N \frac{I}{2R}; \quad B = \mu\mu_0 H .$$

Если  $\mu=1$ , то  $B = \mu\mu_0 H$ .

$$w = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2 I^2}{4R^2} .$$



Подставим значения.

$$w = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{600^2 \cdot 9}{4 \cdot 0,09} = 5,65 \text{ Дж/м}^3$$

Ответ:  $w=5,65 \text{ Дж/м}^3$

Задачи для самостоятельного решения

1. Напряженность магнитного поля  $H=100 \text{ А/м}$ . Вычислить магнитную индукцию  $B$  этого поля в вакууме.

Ответ:  $126 \text{ мкТл}$

2. По двум длинным параллельным проводникам текут в одинаковом направлении токи силой  $I_1=10 \text{ А}$  и  $I_2=15 \text{ А}$ . Расстояние между проводами  $a=10 \text{ см}$ . Определить напряженность  $H$  магнитного поля в точке, удаленной от первого провода на  $r_1=8 \text{ см}$  и от второго на  $r_2=6 \text{ см}$ .

Ответ:  $44,5 \text{ А/м}$

3. Решить задачу 2 при условии, что токи текут в противоположных направлениях, точка удалена от первого провода на  $r_1=15 \text{ см}$  и от второго на  $r_2=10 \text{ см}$ .

Ответ:  $17,4 \text{ А/м}$

4. По тонкому проводнику, изогнутому в виде правильного шестиугольника со стороной  $a=10 \text{ см}$ , идет ток силой  $I=10 \text{ А}$ . Определить магнитную индукцию  $B$  в центре шестиугольника.

Ответ:  $138 \text{ мкТл}$

5. Обмотка соленоида содержит два слоя плотно прилегающих друг к другу витков провода диаметром  $d=0,2 \text{ мм}$ . Определить магнитную индукцию  $B$  на оси соленоида, если по проводу идет ток силой  $I=0,5 \text{ А}$ .

Ответ:  $6,28 \text{ мТл}$

6. В однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,01 \text{ Тл}$  помещен прямой проводник длиной  $\ell = 20 \text{ см}$  (подводящие провода находятся вне поля). Определить силу  $F$ , действующую на проводник, если по нему течет ток силой  $I=50 \text{ А}$ , а угол  $\varphi$  между направлением тока и вектором магнитной индукции равен  $30^\circ$ .

Ответ: 50 мН

7. По витку радиусом  $R=10$  см течет ток силой  $I=50$  А. Виток помещен в однородное магнитное поле ( $B=0,2$  Тл). Определить момент силы  $M$ , действующей на виток, если плотность витка составляет угол  $\varphi=60^\circ$  с линиями индукции.

Ответ: 0,157 Н·м

8. Протон влетел в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и описал дугу радиусом  $R=10$  см. Определить скорость  $v$  протона, если магнитная индукция  $B=1$  Тл.

Ответ: 9,57 Мм/с

9. Определить частоту  $n$  обращения электрона по круговой орбите в магнитном поле ( $B=1$  Тл).

Ответ:  $2,8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ .

10. Кольцо радиусом  $R=10$  см находится в однородном магнитном поле ( $B=0,318$  Тл). Плоскость кольца составляет с линиями индукции угол  $\varphi=30^\circ$ . Вычислить магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий кольцо.

Ответ: 5 мВб

11. По проводнику, согнутому в виде квадрата со стороной  $a=10$  см, течет ток силой  $I=20$  А. Плоскость квадрата перпендикулярна магнитным силовым линиям поля. Определить работу  $A$ , которую необходимо совершить для того, чтобы удалить проводник за пределы поля. Магнитная индукция  $B=0,1$  Тл. Поле считать однородным.

Ответ: 0,02 Дж

12. Проводник длиной  $\ell =1$  м движется со скоростью  $v=5$  м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля. Определить магнитную индукцию  $B$ , если на концах проводника возникает разность потенциалов  $U=0,02$  В.

Ответ: 4 мТл

13. Рамка площадью  $S=50 \text{ см}^2$ , содержащая  $N=100$  витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле ( $B=40$  мТл). Определить

максимальную ЭДС индукции  $\mathcal{E}_{\max}$ , если ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции, а рамка вращается с частотой  $n=960$  об/мин.

Ответ: 2,01 В

14. Соленоид содержит  $N = 4\,000$  витков провода, по которому течет ток силой  $I=20$  А. Определить магнитный поток  $\Phi$  и потокосцепление  $\Psi$ , если индуктивность  $L=0,4$  Гн.

Ответ: 2 мВб; 8 Вб

15. На картонный каркас длиной  $\ell = 50$  см и площадью сечения  $S=4$  см<sup>2</sup> намотан в один слой провод диаметром  $d=0,2$  мм так, что витки плотно прилегают друг к другу (толщиной изоляции пренебречь). Определить индуктивность  $L$  получившегося соленоида.

Ответ: 6,28 мГн

16. Определить силу тока в цепи через  $t=0,01$  с после ее размыкания. Сопротивление цепи  $R=20$  Ом и индуктивность  $L=0,1$  Гн. Сила тока до размыкания цепи  $I_0=50$  А.

Ответ: 6,75 А

17. По обмотке соленоида индуктивностью  $L=0,2$  Гн течет ток силой  $I=10$  А. Определить энергию  $W$  магнитного поля соленоида. Ответ: 10 Дж

#### Задачи к контрольной работе

321. Проволочный виток радиусом  $R=25$  см расположен в плоскости магнитного меридиана. В центре установлена небольшая магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси. На какой угол  $\alpha$  отклонится стрелка, если по витку пустить ток силой  $I=15$  А. Горизонтальную составляющую индукции земного магнитного поля принять равной  $B=20$  мкТл.

322. Магнитная стрелка помещена в центре кругового витка, плоскость которого расположена вертикально и составляет угол  $\varphi=30^\circ$  с плоскостью магнитного меридиана. Радиус витка  $R=20$  см. Определить угол  $\alpha$ , на который повернется магнитная стрелка, если по проводнику пойдет ток

силой  $I=25$  А (дать два ответа). Горизонтальную составляющую индукции земного магнитного поля принять равной  $B=20$  мкТл.

323. По двум длинным параллельным проводам, расстояние между которыми  $d=5$  см, текут одинаковые токи  $I=10$  А. Определить индукцию  $\vec{B}$  и напряженность  $\vec{H}$  магнитного поля в точке, удаленной от каждого провода на расстояние  $r=5$  см, если токи текут: а) в одинаковом; б) в противоположном направлениях.

324. Два бесконечно длинных прямых проводника скрещены под прямым углом. По проводникам текут токи силой  $I_1=100$  А и  $I_2=50$  А. Расстояние между проводниками  $d=20$  см. Определить индукцию  $\vec{B}$  магнитного поля в точке, лежащей на середине общего перпендикуляра к проводникам.

325. Ток силой  $I=50$  А течет по проводнику, согнутому под прямым углом. Найти напряженность  $\vec{H}$  магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии  $b=20$  см. Считать, что оба конца проводника находятся очень далеко от вершины угла.

326. По проводнику, изогнутому в виде окружности, течет ток. Напряженность магнитного поля в центре окружности  $H_1=50$  А/м. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Определить напряженность  $H_2$  магнитного поля в точке пересечения диагоналей этого квадрата.

327. По контуру в виде равностороннего треугольника течет ток силой  $I=50$  А. Сторона треугольника  $a=20$  см. . Определить магнитную индукцию  $\vec{B}$  в точке пересечения высот.

328. По проводнику, согнутому в виде прямоугольника со сторонами  $a=8$  см и  $b=12$  см, течет ток силой  $I=50$  А. . Определить напряженность  $\vec{H}$  и индукцию  $\vec{B}$  магнитного поля в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

329. По двум параллельным проводам длиной  $\ell=3$  м каждый текут одинаковые токи силой  $I=500$  А. Расстояние между проводниками  $d=10$  см. Определить силу  $\vec{F}$  взаимодействия проводников.

330. По трем параллельным прямым проводам, находящимся на одинаковом расстоянии  $d=20$  см друг от друга, текут токи одинаковые силы  $I=400$  А. В двух проводах направления токов совпадают. Вычислить для каждого из проводов отношение силы, действующей на него, к его длине.

331. Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой  $I=200$  А. Определить силу  $\vec{F}$ , действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится от него на расстоянии, равном ее длине.

332. Прямой провод длиной  $\ell=40$  см, по которому течет ток силой  $I=100$  А, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,5$  Тл. Какую работу  $A$  совершат силы, действующие на поле со стороны поля, переместив его на расстояние  $s=40$  см, если направление перемещения перпендикулярно линиям индукции и проводу?

333. Напряженность  $H$  магнитного поля в центре круглого витка равна  $500$  А/м. Магнитный момент витка  $p_m=6$  А·м<sup>2</sup>. Вычислить силу тока  $I$  в витке и радиус  $R$  витка.

334. Короткая катушка площадью поперечного сечения  $S=250$  см<sup>2</sup>, содержащая  $N=500$  витков провода, по которому течет ток силой  $I=5$  А, помещена в однородное магнитное поле напряженностью  $H=1000$  А/м. Найти 1) магнитный момент  $p_m$  катушки; 2) вращающий момент  $M$ , действующий на катушку, если ось катушки составляет угол  $\varphi=30^\circ$  с линиями поля.

335. Виток диаметром  $d=10$  см может вращаться около вертикальной оси, совпадающей с одним из диаметров витка. Виток установили в плоскости магнитного меридиана и пустили по нему ток силой  $I=40$  А. Какой вращающий момент  $M$  нужно приложить к витку, чтобы удержать его

в начальном положении? Горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли принять равной  $B_{\text{г}} = 200$  мкТл.

336. Виток радиусом  $R = 20$  см, по которому течет ток силой  $I = 50$  А, свободно установился в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 10^3$  А/м. Виток повернули относительно диаметра на угол  $\varphi = 30^\circ$ . Определить совершенную работу  $A$ .

337. На оси плоского контура с током находится другой такой же контур. Модули магнитных моментов контуров одинаковы ( $p_{m1} = p_{m2} = A \cdot m^2$ ). Вычислить механический момент  $M$ , действующий на второй контур, если его магнитный момент перпендикулярен магнитному моменту первого контура. Расстояние  $r$  между контурами равно 100 см. Размеры контуров малы по сравнению с расстоянием между ними.

338. Тонкий провод в виде кольца массой  $m = 5$  г свободно подвешен на неупругой нити в однородном магнитном поле. По кольцу течет ток силой  $I = 6$  А. Период  $T$  малых крутильных колебаний относительно вертикальной оси равен 2,2 с. Найти индукцию  $B$  магнитного поля.

339. Из тонкой проволоки массой  $m = 4$  г изготовлена квадратная рамка. Рамка свободно подвешена на неупругой нити и по ней пропущен ток силой  $I = 8$  А. Определить частоту  $\nu$  малых колебаний рамки в магнитном поле с индукцией  $B = 20$  мТл.

340. Тонкое кольцо радиусом  $R = 20$  см несет равномерно распределенный заряд  $Q = 40$  нКл. Кольцо вращается относительно оси совпадающей с одним из диаметров кольца, с частотой  $n = 20$  с<sup>-1</sup>. Определить  
1) магнитный момент  $p_m$ , обусловленный вращением заряженного кольца;  
2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $p_m/L$ , если кольцо имеет массу  $m = 10$  г.

341. Диск радиусом  $R = 5$  см несет равномерно распределенный по поверхности заряд  $Q = 0,1$  мкКл. Диск равномерно вращается относительно оси, проходящей через его центр и перпендикулярной плоскости диска. Частота вращения  $n = 50$  с<sup>-1</sup>. Определить 1) магнитный момент  $p_m$  кругового

тока, создаваемого диском; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $p_m/L$ , если масса диска  $m=100$  г.

342. По тонкому стержню длиной  $\ell = 40$  см равномерно распределен заряд  $Q=500$  нКл. Стержень приведен во вращение с постоянной угловой скоростью  $\omega=20$  рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину. Определить 1) магнитный момент  $p_m$ , обусловленный вращением заряженного стержня; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса  $p_m/L$ , если стержень имеет массу  $m=10$  г.

343. Электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите некоторого радиуса. Найти отношение магнитного момента эквивалентного кругового тока к моменту импульса орбитального движения электрона  $p_m/L$ . Заряд электрона и его массу считать известными. Указать на чертеже направление векторов  $\vec{p}_m$  и  $\vec{L}$ .

344. Два иона с одинаковыми зарядами, пройдя одну и ту же ускоряющую разность потенциалов, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Один ион, масса которого  $m_1 = 12$  а.е.м., описал дугу окружности радиусом  $R_1=2$  см. Определить массу  $m_2$  (в а.е.м.) другого иона, который описал дугу окружности радиусом  $R_2=2,31$  см.

345. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B=0,2$  Тл под углом  $\alpha=30^\circ$  к направлению линий индукции. Определить силу Лоренца  $\vec{F}_L$ , если скорость частицы  $v=10,5$  м/с.

346. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Определить момент импульса  $L$ , которым обладала частица при движении в магнитном поле, если радиус траектории частицы  $R=0,5$  мм.

347. Электрон движется в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции. Определить силу  $\vec{F}$ , действующую на

электрон со стороны поля, если индукция поля  $B=0,2$  Тл, а радиус кривизны траектории  $R=0,2$  см.

348. Заряженная частица с кинетической энергией  $T=2$  кэВ движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R=4$  мм. Определить силу Лоренца  $\vec{F}_L$ , действующую на частицу со стороны поля.

349. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с напряженностью  $H=5 \cdot 10^3$  А/м. Определить частоту обращения  $n$  электрона.

350. Протон и  $\alpha$ -частица, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус  $R_1$  кривизны траектории протона больше радиуса  $R_2$  кривизны траектории  $\alpha$ -частицы?

351. Плоский контур площадью  $S=20$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,03$  Тл. Определить магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, если плоскость его составляет угол  $\varphi=60^\circ$  с направлением линий индукции.

352. Магнитный поток  $\Phi$  сквозь сечение соленоида равен 50 мкВб. Длина соленоида  $\ell=50$  см. Найти магнитный момент  $p_m$  соленоида, если его витки плотно прилегают друг к другу.

353. В средней части соленоида, содержащего  $n=8$  витков/см, помещен круговой виток диаметром  $d=4$  см. Плоскость витка расположена под углом  $\varphi=60^\circ$  к оси соленоида. Определить магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий виток, если по обмотке соленоида течет ток силой  $I=1$  А.

354. На длинный картонный каркас диаметром  $d=5$  см уложена однослойная обмотка (виток к витку) из проволоки диаметром  $d=0,2$  мм. Определить магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый таким соленоидом при силе тока  $I=1$  А.

355. Квадратный контур со стороной  $a=10$  см, в котором течет ток силой  $I=6$  А, находится в магнитном поле с индукцией  $B=0,8$  Тл под углом



$\alpha=50^\circ$  к линиям индукции. Какую работу нужно совершить, чтобы при неизменной силе тока в контуре изменить его форму на окружность?

356. Рамка, содержащая  $N=1000$  витков площадью  $S=100 \text{ см}^2$ , равномерно вращается с частотой  $n=10 \text{ с}^{-1}$  в магнитном поле напряженностью  $H=10^4 \text{ А/м}$ . Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярно линиям напряженности. Определить максимальную ЭДС индукции  $\mathcal{E}_{\max}$ , возникающую в рамке.

357. Плоский контур с током силой  $I=5 \text{ А}$  свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,4 \text{ Тл}$ . Площадь контура  $S=200 \text{ см}^2$ . Поддерживая ток в контуре неизменным, его повернули относительно оси, лежащей в плоскости контура, на угол  $\alpha=40^\circ$ . Определить совершенную при этом работу  $A$ .

358. Виток, в котором поддерживается постоянная сила тока  $I=60 \text{ А}$ , свободно установился в однородном магнитном поле ( $B=20 \text{ мТл}$ ). Диаметр витка  $d=10 \text{ см}$ . Какую работу  $A$  нужно совершить для того, чтобы повернуть виток относительно оси, совпадающей с диаметром, на угол  $\alpha=\pi/3$  ?

359. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен плоский контур площадью  $S=100 \text{ см}^2$ . Поддерживая в контуре постоянную силу тока  $I=50 \text{ А}$ , его переместили из поля в область пространства, где поле отсутствует. Определить индукцию  $B$  магнитного поля, если при перемещении контура была совершена работа  $A=0,4 \text{ Дж}$ .

360. Рамка площадью  $S=100 \text{ см}^2$  равномерно вращается с частотой  $n=5 \text{ с}^{-1}$  относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям индукции однородного магнитного поля ( $B=0,5 \text{ Тл}$ ). Определить среднее значение ЭДС индукции  $\langle \mathcal{E}_i \rangle$  за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения.

361. Соленоид сечением  $S=10 \text{ см}^2$  содержит 1000 витков. Индукция  $B$  магнитного поля внутри соленоида при силе тока  $I=5 \text{ А}$  равна  $0,1 \text{ Тл}$ . Определить индуктивность  $L$  соленоида.

362. На картонный каркас длиной  $\ell=0,8 \text{ м}$  и диаметром  $D=4 \text{ см}$  намотан в один слой провод диаметром  $d=0,25 \text{ мм}$  так, что витки плотно прилегают друг к другу. Вычислить индуктивность  $L$  получившегося соленоида.

363. Катушка, намотанная на немагнитный цилиндрический каркас, имеет  $N=250$  витков и индуктивность  $L_1=36 \text{ мГн}$ . Чтобы увеличить индуктивность катушки до  $L_2=100 \text{ мГн}$ , обмотку катушки сняли и заменили обмоткой из более тонкой проволоки с таким расчетом, чтобы длина катушки осталась прежней. Сколько витков оказалось в катушке после перемотки?

364. Индуктивность соленоида, намотанного в один слой на немагнитный каркас,  $L=0,5 \text{ мГн}$ . Длина соленоида  $\ell=0,6 \text{ м}$ , диаметр  $D=2 \text{ см}$ . Определить отношение  $n$  числа витков соленоида к его длине.

365. Соленоид содержит 1000 витков. При силе тока  $I=10 \text{ А}$  магнитный поток  $\Phi=80 \text{ мкВб}$ . Определить индуктивность  $L$  соленоида.

366. Силу тока в катушке равномерно увеличивают с помощью реостата на  $\Delta I=0,6 \text{ А}$  в секунду. Найти среднее значение ЭДС  $\langle \varepsilon_i \rangle$  самоиндукции, если индуктивность катушки  $L=5 \text{ мГн}$ .

367. Соленоид содержит  $N=800$  витков. Сечение сердечника (из немагнитного материала)  $S=10 \text{ см}^2$ . По обмоткам течет ток, создающий поле с индукцией  $B=8 \text{ мТл}$ . Определить среднее значение ЭДС  $\langle \varepsilon_i \rangle$  самоиндукции, которая возникает на зажимах соленоида, если сила тока уменьшается практически до нуля за время  $\Delta t=0,8 \text{ мс}$ .

368. По катушке индуктивностью  $L=8 \text{ мкГн}$  течет ток силой  $I=6 \text{ А}$ . При выключении тока его сила изменяется практически до нуля за время  $\Delta t=5 \text{ мс}$ . Определить среднее значение ЭДС  $\langle \varepsilon_i \rangle$  самоиндукции, возникающей в контуре.

369. В электрической цепи, содержащей сопротивление  $r=20$  Ом и индуктивность  $L=0,06$  Гн, течет ток силой  $I=20$  А. Определить силу тока в цепи через  $\Delta t=0,2$  мс после ее размыкания.

370. По замкнутой цепи с сопротивлением  $R=20$  Ом течет ток. Через время  $t=8$  мс после размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 20 раз. Определить индуктивность  $L$  цепи.

### 3.3 ОПТИКА

#### Основные формулы

Скорость света в среде

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

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$n$  – показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны

$$L = n\ell,$$

где  $\ell$  – геометрическая длина пути световой волны в среде с показателем преломления  $n$ .

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

Зависимость разности фаз от оптической разности хода световых волн

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{\Delta}{\lambda}\right),$$

где  $\lambda$  – длина световой волны.

Условие максимального усиления света при интерференции

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие максимального ослабления света

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

Оптическая разность хода световых волн, возникающая при отражении монохроматического света от тонкой пленки

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \frac{\lambda}{2}, \text{ или}$$

$$\Delta = 2dn \cos i_2 + \frac{\lambda}{2},$$

где  $d$  – толщина пленки;

$n$  – показатель преломления пленки;

$i_1$  – угол падения;

$i_2$  – угол преломления света в пленке.

Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}, \quad (k=1, 2, 3 \dots),$$

где  $k$  – номер кольца;

$R$  – радиус кривизны линзы.

Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете

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

Угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции на одной щели, связан с шириной щели  $a$  и порядковым номером максимума  $k$

$$a \sin \varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \quad (k=0, 1, 2, 3 \dots).$$

При дифракции света на дифракционной решетке

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (k=0, 1, 2, 3 \dots),$$

где  $d$  – период дифракционной решетки.

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 быть видны отдельно в спектре, полученном посредством данной решетки;

$N$  – полное число щелей решетки.

## Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_1 = n_{21},$$

где  $i_1$  – угол падения, при котором отразившийся от диэлектрика луч полностью поляризован;

$n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

## Закон Малюса

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

где  $I_0$  – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор;

$I$  – интенсивность этого света после анализатора;

$\alpha$  – угол между направлением колебаний электрического вектора света, падающего на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора.

Угол поворота плоскости поляризации монохроматического света при прохождении через оптически активное вещество

$$\varphi = \alpha d \quad (\text{в твердых телах}),$$

где  $\alpha$  – постоянная вращения;

$d$  – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе.

$$\varphi = [\alpha] \rho d \quad (\text{в растворах}),$$

где  $[\alpha]$  – удельное вращение;

$\rho$  – концентрация оптически активного вещества в растворе.

## Примеры решения задач

Пример 1. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус  $r_3$  третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны  $\lambda=0,6$  мкм равен 0,86 мм. Радиус кривизны линзы  $R=0,6$  м.

Дано:

$$r_3 = 0,86 \text{ мм} = 0,86 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\lambda = 0,6 \text{ мкм} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$R = 0,6 \text{ м}$$

$$n = ?$$

При наблюдении колец Ньютона в отраженном свете условие минимума света определяется формулой

$$2h\lambda = k\lambda,$$

где  $h$  – толщина слоя жидкости между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой;

$n$  – показатель преломления жидкости;

$k$  – номер кольца;

$\lambda$  – длина волны.

Согласно рисунку 3.3.1 имеем

$$R^2 = r_k^2 + (R - h)^2.$$

$$2Rh = r_k^2 + h, \quad h < r_k.$$

Так как радиус кривизны  $R$  линзы велик по сравнению с  $\lambda$  и по сравнению с  $h$ ,

$$2Rh \approx r_k^2, \quad h = \frac{r_k^2}{2R}.$$

Произведя подстановку в формулу условия минимума света при наблюдении колец Ньютона в отраженном свете, будем иметь

$$\frac{nr_k^2}{R} = k\lambda.$$

$$n = \frac{k\lambda R}{r_k^2},$$

или для нашей задачи

Решение

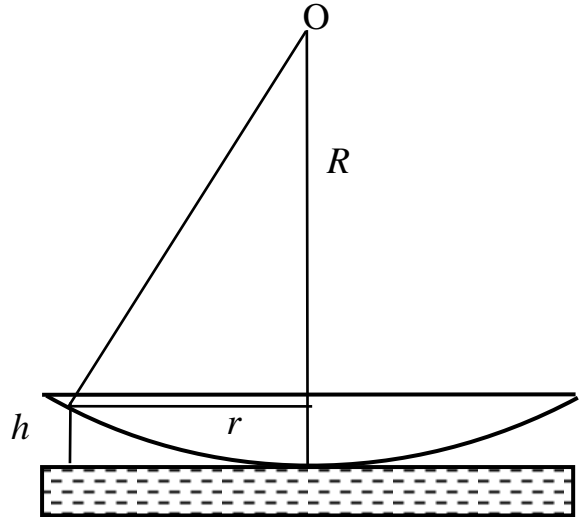


Рис. 3.3.1

$$n = \frac{3\lambda R}{r_3^2} = \frac{3 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6}{(0,86 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{3 \cdot 0,36}{0,7396} = 1,46$$

Ответ:  $n = 1,46$

Пример 2. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ( $\lambda_1 = 780$  нм) спектра третьего порядка?

Дано:

$$\lambda_1 = 780 \text{ нм}$$

$$k_1 = 3$$

$$k_2 = 4$$

$$\lambda_2 = ?$$

Решение

Из формулы дифракционной решетки (условие максимума)  $d \sin \varphi = \pm k \lambda$  имеем

$$d \sin \varphi = \pm k_1 \lambda_1, \quad k_1 = 3.$$

$$d \sin \varphi = \pm k_2 \lambda_2, \quad k_2 = 4.$$

По условию задачи углы отклонения одинаковые. Отсюда

$$k_1 \lambda_1 = k_2 \lambda_2.$$

$$\lambda_2 = \frac{k_1 \lambda_1}{k_2} = \frac{3 \cdot 780}{4} = 585 \text{ нм}$$

В спектре четвертого порядка на длину волны 585 нм накладывается граница спектра третьего порядка.

Пример 3. На поверхность дифракционной решетки нормально падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в 3,4 раза больше длины световой волны. Найти общее число  $M$  дифракционных максимумов, которые теоретически возможно наблюдать в данном случае.

Дано:

$$n = \frac{d}{\lambda} = 3,4$$

$$M = ?$$

Решение

Из формулы дифракционной решетки  $d \sin \varphi = k \lambda$

$$k = \frac{d \sin \varphi}{\lambda}.$$

$\max \sin \varphi = 1$ , значит  $k \leq \frac{d}{\lambda}$ . Больше  $\frac{d}{\lambda}$   $k$  не может быть.

$$k \leq 3,4. \quad k - \text{целое, значит } k = 3.$$

Общее число максимумов

$$M = 2k + 1 = 7.$$

Пример 4. На тонкую глицериновую пленку толщиной  $d=2$  мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить длины волн  $\lambda$  лучей видимого участка спектра.  $0,5 \leq \lambda \leq 0,9$  мкм, которые будут ослаблены в результате интерференции.

Дано:

$$d=2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$0,5 \cdot 10^{-6} \leq \lambda \leq 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$n=1,47$$

$$\lambda_i = ?$$

Решение

Условие ослабления света при интерференции

$$\Delta = \pm(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, 3.$$

$\Delta$  – оптическая разность хода лучей.

При интерференции от тонких пленок

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \frac{\lambda}{2},$$

где  $d$  – толщина пленки;

$i_1$  – угол падения лучей.

По условию  $i_1 = 0$ ,  $\sin i_1 = 0$ . Имеем

$$(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - 0} + \frac{\lambda}{2};$$

$$k\lambda + \frac{\lambda}{2} = 2dn + \frac{\lambda}{2};$$

$$k\lambda = 2dn;$$

$$\lambda = \frac{2dn}{k}.$$

$$k_{\max} = \frac{2dn}{\lambda_{\min}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{0,5 \cdot 10^{-6}} \approx 11$$

$$k_{\min} = \frac{2dn}{\lambda_{\max}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{0,9 \cdot 10^{-6}} \approx 6$$

$$k = 6, 7, 8, 9, 10, 11.$$

$$\lambda_1 = \frac{2dn}{6} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{6} = 9,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$



$$\lambda_2 = \frac{2dn}{7} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{7} = 0,84 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda_3 = \frac{2dn}{8} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{8} = 0,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda_4 = \frac{2dn}{9} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{9} = 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda_5 = \frac{2dn}{10} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{10} = 0,588 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda_6 = \frac{2dn}{11} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47}{11} = 0,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

В результате интерференции будут ослаблены волны с длинами  $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ .

Пример 5. Пластину кварца толщиной  $d=3$  мм поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол  $60^\circ$ . Какой толщиной  $d_{\min}$  следует взять пластину, чтобы поле зрения поляриметра стало совершенно темным?

Дано:

$$d=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\varphi=60^\circ$$

$$d_{\min} = ?$$

Решение

$$\varphi = \alpha d,$$

где  $\varphi$  – угол поворота плоскости поляризации при прохождении через оптически активное вещество;

$d$  – длина пути света.

Для кварца  $\alpha = \frac{\varphi}{d}$ .

Чтобы поле было темным,  $\varphi_1=90^\circ$ .

$$\varphi_1 = \alpha \cdot d_{\min}$$

$$d_{\min} = \frac{\varphi_1}{\alpha} = \frac{\varphi_1 d}{\varphi} = \frac{90 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{60} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Пластину необходимо взять толщиной  $4,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Пример 6. Угол падения  $i_1$  луча на поверхность стекла равен  $60^\circ$ . При этом отраженный пучок света оказался максимально поляризованным. Определить угол  $i_2$  преломления луча.

Дано:

$$i_1 = 60^\circ$$

$n_2 = 1,5$  – показатель преломления стекла

$n_1 = 1$  – показатель преломления воздуха

$i_2$

Решение

По закону Брюстера

максимальной поляризации

соответствует  $\operatorname{tg} i_1 = n_{21}$ ,

где  $n_{21}$  – относительный

показатель преломления стекла и

воздуха. Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей второй и первой среды.

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1};$$

$$\sin i_2 = \frac{\sin i_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{0,86 \cdot 1}{1,5} = 0,5733;$$

Угол преломления  $i_2 = 35^\circ$ .

Ответ:  $i_2 = 35^\circ$

Задачи для самостоятельного решения

1. На пути пучка света поставлена стеклянная пластина толщиной  $d = 1$  мм так, что угол падения луча  $i_1 = 30^\circ$ . На сколько изменится оптическая длина пути светового пучка?

Ответ: 550 мкм

2. На мыльную пленку с показателем преломления  $n_1 = 1,33$  падает по нормали монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина  $d_{\min}$  пленки?

Ответ: 0,113 мкм

3. Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном свете  $r_2 = 0,4$  мм. Определить радиус  $R$  кривизны плосковыпуклой линзы, взятой

для опыта, если она освещается монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda=0,64$  мкм. Ответ: 125 мм

4. На пластину с щелью, ширина которой  $a=0,05$  мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=0,7$  мкм. Определить угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующий первому дифракционному максимуму.

Ответ:  $1^{\circ}12'$

5. Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр третьего порядка на угол  $\varphi_1=30^{\circ}$ . На какой угол  $\varphi_2$  отклоняет она спектр четвертого порядка?

Ответ:  $41^{\circ}50'$

6. Угол преломления луча в жидкости  $i_2 = 35^{\circ}$ . Определить показатель преломления  $n$  жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован. Ответ: 1,48

7. На сколько процентов уменьшается интенсивность света после прохождения через призму Николя, если потери света составляют 10%.

Ответ: на 55%

8. При какой скорости  $v$  релятивистская масса частицы в  $k=3$  раза больше массы покоя этой частицы?

Ответ:  $2,83 \cdot 10^8$  м/с

9. Электрон движется со скоростью  $v=0,6c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Определить релятивистский импульс  $p$  электрона.

Ответ:  $2,0 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с

10. Вычислить энергию, излучаемую за время  $t=1$  мин с площади  $S=1$  см<sup>2</sup> абсолютно черного тела, температура которого  $T=1000$  К.

Ответ: 340 Дж

11. Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела,  $\lambda_m=0,6$  мкм.. Определить температуру  $T$  тела.

Ответ: 4,82 кК

Задачи к контрольной работе.

371. Какое наименьшее число  $N_{\min}$  штрихов должна содержать дифракционная решетка, чтобы в спектре второго порядка можно было видеть отдельно две желтые линии натрия с длинами волн  $\lambda_1=589,0$  нм и  $\lambda_2=589,6$  нм? Какова длина  $\ell$  такой решетки, если постоянная решетки  $d=5$  мкм?

372. На поверхность дифракционной решетки нормально к ее поверхности падает монохроматический свет. Постоянная дифракционной решетки в  $n=4,6$  раза больше длины световой волны. Найти общее число  $M$  дифракционных максимумов, которые теоретически можно наблюдать в данном случае.

373. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ( $\lambda=780$  нм) спектра третьего порядка?

374. Плосковыпуклая стеклянная линза с  $f=1$  м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете  $r_5=1,1$  мм. Определить длину световой волны.

375. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ( $\lambda=590$  нм). Радиус кривизны  $R$  линзы равен 5 см. Определить толщину  $d_3$  воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье светлое кольцо.

376. На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет ( $\lambda=410$  нм). Угол  $\Delta\varphi$  между направлениями на максимумы первого и второго порядков равен  $2^{\circ}21'$ . Определить число  $n$  штрихов на 1 мм дифракционной решетки.

377. На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна ( $\lambda=600$  нм). Угол отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному максимуму,  $\varphi=20^{\circ}$ . Определить ширину  $a$  щели.

378. На грань кристалла каменной соли падает параллельный пучок рентгеновского излучения. Расстояние  $d$  между атомными плоскостями равно 280 пм. Под углом  $\theta=65^\circ$  к атомной плоскости наблюдается дифракционный максимум первого порядка. Определить длину волны  $\lambda$  рентгеновского излучения.

379. На дифракционную решетку, содержащую  $n=600$  штрихов на миллиметр, падает нормально белый свет. Спектр проецируется помещенной вблизи решетки линзой на экран. Определить длину  $\ell$  спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана  $L=1,2$  м. Границы видимого спектра:  $\lambda_{\text{кр}}=780$  нм,  $\lambda_{\text{ф}}=400$  нм.

380. Расстояние между штрихами дифракционной решетки  $d=4$  мкм. На решетку падает нормально свет с длиной волны  $\lambda=0,58$  мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

381. Пластинку кварца толщиной  $d=2$  мм поместили между параллельными николями, в результате чего плоскость поляризации монохроматического света повернулась на угол  $\varphi = 53^\circ$ . Какой наименьшей толщины  $d_{\text{min}}$  следует взять пластинку, чтобы поле зрения поляриметра стало совершенно темным?

382. Параллельный пучок света переходит из глицерина в стекло так, что пучок, отраженный от границы раздела этих сред, оказывается максимально поляризованным. Определить угол  $\gamma$  между падающим и преломленным пучками.

383. При прохождении света через трубку длиной  $\ell_1=20$  см, содержащую раствор сахара концентрацией  $C_1=10\%$ , плоскость поляризации света повернулась на угол  $\varphi_1 = 13,3^\circ$ . В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной  $\ell_2=15$  см, плоскость поляризации повернулась на угол  $\varphi_2=5,2^\circ$ . Определить концентрацию  $C_2$  второго раствора.

384. Пучок света последовательно проходит через два николя, плоскости пропускания которых образуют между собой угол  $\varphi = 40^\circ$ . Принимая, что коэффициент поглощения  $k$  каждого николя равен 0,15,

найти, во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый николю.

385. Пучок света, идущий в стеклянном сосуде с глицерином, отражается от дна сосуда. При каком угле  $\varepsilon$  падения отраженный пучок света максимально поляризован?

386. Пучок света переходит из жидкости в стекло. Угол падения  $\varepsilon$  пучка равен  $60^\circ$ , угол преломления  $\varepsilon_2' = 50^\circ$ . При каком угле падения  $\varepsilon_B$  пучок света, отраженный от границы раздела этих сред, будет максимально поляризован?

387. Пучок света падает на плоскопараллельную стеклянную пластину, нижняя поверхность которой находится в воде. При каком угле падения  $\varepsilon_B$  свет, отраженный от границы стекло-вода, будет максимально поляризован?

388. Угол  $\alpha$  между плоскостями пропускания поляроидов равен  $50^\circ$ . Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в  $n = 8$  раз. Пренебрегая потерей света при отражении, определить коэффициент поглощения  $k$  света в поляроидах.

389. Угол падения  $\varepsilon$  луча на поверхность стекла равен  $60^\circ$ . При этом отраженный пучок света оказался максимально поляризованным. Определить угол  $\varepsilon_2'$  преломления луча.

390. Кварцевую пластинку поместили между скрещенными николями. При какой наименьшей толщине  $d_{\min}$  кварцевой пластины поле зрения между николями будет максимально просветлено? Постоянная вращения  $\alpha$  кварца равна  $27$  град/мм.

### 3.4 ФОТОЭФФЕКТ, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

#### 3.4.1 Фотоэффект. Основные формулы.

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\nu,$$

где  $h$  - постоянная Планка;

$\nu$  - частота фотона.

Масса фотона

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

где  $\varepsilon$  - энергия фотона;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны фотона.

Импульс фотона

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

Уравнение Эйнштейна (закон сохранения энергии для взаимодействия фотона и электрона) для фотоэффекта

$$h\nu = A + T_{\max} = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2},$$

где  $h\nu$  – энергия фотона, падающего на поверхность металла;

$A$  – работа выхода электрона из металла;

$T_{\max}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad \text{или} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где  $\nu_0$  – минимальная частота света, при которой еще возможен фотоэффект;

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

$h$  - постоянная Планка;

$c$  – скорость света в вакууме.

### 3.4.2 Атом водорода по теории Бора. Основные формулы.

Момент импульса электрона

$$L_n = n\eta, \quad \text{или} \quad m\nu_n r_n = n\eta,$$

где  $m$  – масса электрона;

$\nu_n$  – скорость электрона на  $n$ -ой орбите;

$r_n$  – радиус  $n$ -ой стационарной орбиты;

$\eta = \frac{h}{2\pi}$ ;  $h$  – постоянная Планка;

$n$  – главное квантовое число ( $n=1, 2, 3 \dots$ ).

Радиус  $n$ -ой стационарной орбиты

$$r_n = a_0 \cdot n^2,$$

где  $a_0$  – радиус Бора (радиус первой стационарной орбиты).

Энергия электрона в атоме водорода

$$W_n = \frac{W_i}{n^2},$$

где  $W_i$  – энергия ионизации атома водорода.

Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода

$$\varepsilon = h\nu = Wn_2 - Wn_1, \quad \text{или}$$

$$\varepsilon = W_i \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона в атоме.

Потенциальная энергия электрона в атоме водорода

$$\Pi = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n},$$

где  $e$  – заряд электрона;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$r_n$  – радиус  $n$ -ой орбиты.

Кинетическая энергия электрона в атоме водорода

$$T = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}.$$

Полная энергия электрона в атоме водорода

$$W = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}.$$

### 3.4.3 Физика атомного ядра. Радиоактивность. Ядерные реакции

Массовое число ядра (общее число нуклонов в ядре)

$$A = Z + N,$$

где  $Z$  – зарядовое число (число протонов);

$N$  – число нейтронов.

Дефект массы ядра

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



где  $Z$  - число протонов в ядре;

$A$  – массовое число (число нуклонов в ядре);

$m_p$  – масса протона;

$m_n$  - масса нейтрона;

$m_{\text{я}}$  – масса ядра.

Энергия связи

$$\Delta E = c^2 \Delta m,$$

где  $c$  - скорость света в вакууме;

$$c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2, \quad \text{или} \quad c^2 = \frac{\Delta E}{\Delta m} = 931 \text{ МэВ/а.е.м.}$$

Энергетический эффект ядерной реакции  ${}_{Z_1}^{A_1}X + {}_{Z_2}^{A_2}Y = {}_{Z_3}^{A_3}X_1 + {}_{Z_4}^{A_4}Y_1$ ,

где  $X, Y, X_1, Y_1$  – ядра,  $A$  – их массовые числа,  $Z$  – их зарядовые числа, определяется по формуле

$$Q = 931 \cdot [(m_X + m_Y) - (m_{X_1} + m_{Y_1})].$$

В первых круглых скобках указаны массы исходных ядер, во вторых – массы ядер- продуктов реакции. При числовых подсчетах по этой формуле массы ядер заменяют массами нейтральных атомов.

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 исходных ядер и образовавшихся ядер содержат одинаковое число электронов. При вычитании суммы масс электронов выпадают и остаются массы ядер.

При ядерных реакциях выполняются законы сохранения числа нуклонов (массового числа) и сохранения заряда, то есть

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4;$$

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4.$$

Активность  $A$  изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа ядер, распавшихся за время  $dt$ , к этому времени.

$$A = -\frac{dN}{dt}.$$

Знак « - » показывает, что число  $N$  радиоактивных ядер убывает.

Закон радиоактивного распада

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

где  $N$  - число радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе в момент  $t$ ;

$N_0$  - число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за начальный ( $t=0$ );

$\lambda$  - постоянная радиоактивного распада.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}},$$

где  $T_{1/2}$  – период полураспада.

Число  $N_0$  радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, равно произведению постоянной Авогадро  $N_A$  на количество вещества  $\nu$  данного изотопа.

$$N_0 = \nu \cdot N_A = \frac{m}{\mu} \cdot N_A,$$

где  $m$  – масса изотопов;

$\mu$  – молярная масса.

### Примеры решения задач

Пример 1. Красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_0=310$  нм. Определить максимальную кинетическую энергию  $T_{\max}$  фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падает свет с длиной волны  $\lambda=240$  нм.

Дано:

$$\lambda_0=310 \text{ нм} = 310 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\lambda=240 \text{ нм} = 240 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

Решение

Применяем формулу Эйнштейна.

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

$$T_{\max} = ?$$

$$T_{\max} = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0}.$$

Так как  $\nu = \frac{1}{T}, \quad T = \frac{1}{\nu};$

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}, \quad \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

$$\begin{aligned} T_{\max} - hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) &= 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \left( \frac{1}{240 \cdot 10^{-9}} - \frac{1}{310 \cdot 10^{-9}} \right) = \\ &= 6,63 \cdot 3 \cdot 10^{-26} \cdot 10^8 \cdot \left( \frac{1}{24} - \frac{1}{31} \right) = 6,63 \cdot 3 \cdot 10^{-18} \cdot (0,042 - 0,032) = 19,89 \cdot 0,01 \cdot 10^{-18} = \\ &= 1,989 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \end{aligned}$$

Переводим единицы измерения в электрон-вольты.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$T_{\max} = 1,24 \text{ эВ}$$

Ответ:  $T_{\max} = 1,24 \text{ эВ}$

Пример 2. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,2 \text{ мкм}$ . Красная граница фотоэффекта  $\lambda_0 = 0,4 \text{ мкм}$ . Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

Дано:

$$\lambda = 0,2 \text{ мкм} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda_0 = 0,4 \text{ мкм} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\frac{T}{h\nu} = ?$$

Решение

Применяем формулу Эйнштейна.

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_0} + T$$

Так как  $\frac{T}{h\nu} = \frac{T}{h \frac{c}{\lambda}}$ , из формулы Эйнштейна,

поделив на  $\frac{hc}{\lambda}$ , имеем

$$1 = \frac{\lambda}{\lambda_0} + \frac{T}{h \frac{c}{\lambda}}, \quad \text{то есть}$$

$$\frac{T}{h\nu} = 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 - \frac{0,2 \cdot 10^{-6}}{0,4 \cdot 10^{-6}} = 1 - \frac{1}{2} = 0,5$$

На сообщение электрону кинетической энергии расходуется половина энергии фотона.

Пример 3. На металл падает рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda=2$  пм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость фотоэлектронов.

Дано:	Решение
$\lambda=2 \text{ пм} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ м}$	Подсчитаем энергию фотона рентгеновского излучения.
$\nu_{\text{max}} - ?$	
$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^{-12}} = 9,945 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} =$ $= \frac{9,945 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 6,215 \cdot 10^5 \text{ эВ} = 0,62 \text{ МэВ}.$	

По условию задачи  $A=0$ , значит максимальная кинетическая энергия электрона равна энергии фотона.

$$\varepsilon=0,62 \text{ МэВ}.$$

Эта величина сравнима с энергией покоя электрона, следовательно, для определения скорости фотоэлектронов необходимо взять релятивистскую формулу энергии.

$$T = E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right),$$

$$\beta = \sqrt{T(T + 2E_0)} \cdot \frac{1}{T + E_0}.$$

$$\nu = c\beta = c \sqrt{T(T + 2E_0)} \cdot \frac{1}{T + E_0}.$$

$$\nu_{\text{max}} = 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{0,62(0,62 + 2 \cdot 0,511)} \cdot \frac{1}{0,62 + 0,511} = 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{0,62 \cdot (0,62 + 1,022)} \cdot \frac{1}{1,131} =$$

$$= 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1,01}{1,131} = 2,31 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Примечание. Если окажется по условию Вашей задачи, что кинетическая энергия фотоэлектрона много меньше энергии покоя электрона

(0,511 МэВ), то применяем классическую формулу  $T = \frac{mv^2}{2}$  для

определения максимальной скорости фотоэлектронов и тогда  $v_{\max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}}$

при условии  $A=0$ .

$$\text{Если } A \neq 0, \quad \text{то} \quad v_{\max} = \sqrt{\frac{2(\varepsilon - A)}{m}},$$

где  $\varepsilon$  – энергия фотона;

$m$  – масса электрона;

$A$  – работа выхода электрона.

Пример 4. Вычислить по теории Бора период  $T$  вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом  $n=3$ .

Дано:

$$n=3$$

$$T=?$$

Решение

Ядро атома водорода и вращающийся вокруг него электрон взаимодействуют по закону Кулона с силой

$$F = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2},$$

где  $e$  – заряд электрона;

$r$  – радиус орбиты;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Эта сила сообщает электрону центростремительное ускорение, и закон движения электронов можно записать в виде

$$m \frac{v}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2},$$

где  $v$  – скорость движения электрона по орбите.

По второму постулату Бора

$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}.$$

Из этих двух соотношений имеем

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \cdot n^2 = r_1 \cdot n^2.$$

Численное значение

$$r_1 = \frac{6,63^2 \cdot 10^{-68} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{3,14 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6^2 \cdot 10^{-38}} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м} - \text{радиус первой}$$

стационарной орбиты.

Из второго постулата Бора

$$v_n = \frac{nh}{2\pi r_n m} = \frac{nh}{2\pi m r_1 n^2} = \frac{v_1}{n}.$$

Угловая скорость обращения электрона при  $n=3$  будет

$$\omega_3 = \frac{v_3}{r_3} = \frac{v_1}{nr_1 n^2} = \frac{v_1}{r_1 n^3} = \frac{v_1}{27r_1}.$$

Период  $T$  обращения электрона на этой орбите

$$T = \frac{2\pi}{\omega_3} = \frac{2\pi \cdot 27r_1}{v_1} = \frac{54\pi \cdot r_1}{v_1}.$$

$$v_1 = \frac{h}{2\pi m r_1} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 0,529 \cdot 10^{-10}} = 2,19 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

$$T = \frac{54 \cdot 3,14 \cdot 0,529 \cdot 10^{-10}}{2,19 \cdot 10^6} = 40,93 \cdot 10^{-16} = 4,10 \cdot 10^{-15} \text{ с}.$$

Ответ:  $T=4,10 \cdot 10^{-15} \text{ с}$

Пример 5. Найти наименьшую  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  длины волн в серии Бальмера атома водорода.

Дано:

$$n_1 = 2$$

$$\lambda_{\min} = ?$$

$$\lambda_{\max} = ?$$

Решение

Энергия, излучаемая или поглощаемая электроном атома водорода при переходе из одного стационарного энергетического состояния в другое, вычисляется по формуле

$$\varepsilon = W_i \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где  $W_i$  - энергия ионизации атома водорода.  $W_i = 13,6 \text{ эВ} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$ .

Для серии Бальмера

$$n_1 = 2, \quad n_2 = 3, 4, 5, 6 \dots$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{W_i}{4} = 3,4 \text{ эВ} = 0,54 \cdot 10^{-18} \text{ Дж};$$

$$\varepsilon_{\min} = W_i \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) = \frac{5}{36} W_i = \frac{5}{36} \cdot 13,6 = 1,88 \text{ эВ} = 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}.$$

Минимальная длина волны

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{\varepsilon_{\max}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,54 \cdot 10^{-18}} = 36,83 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 368,3 \text{ нм}.$$

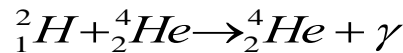
Максимальная длина волны

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{\varepsilon_{\min}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,3 \cdot 10^{-18}} = 66,3 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 663 \text{ нм}$$

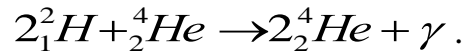
Ответ:  $\lambda_{\min} = 368,3 \text{ нм}; \lambda_{\max} = 663 \text{ нм}$

Пример 6. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^2_1\text{H}(\alpha, \gamma){}^4_2\text{He}$ .

Решение



Легко видеть, что такая реакция не может быть, так как не выполняются требуемые законы сохранения массового числа и заряда. Законом сохранения соответствует реакция



Дефект массы в этой реакции

$$\Delta m = (2m_{{}^2_1\text{H}} + m_{{}^4_2\text{He}}) - 2m_{{}^4_2\text{He}} = 2m_{{}^2_1\text{H}} - m_{{}^4_2\text{He}}.$$

Массы нейтральных атомов

$$m_{{}^2_1\text{H}} = 2,01410 \text{ а.е.м.}$$

$$m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m = 4,02820 - 4,00260 = 0,02560.$$

Энергия реакции

$$E = 931 \cdot \Delta m = 931 \cdot 0,02560 = 23,8336 \text{ МэВ}.$$

Ответ:  $E = 23,83 \text{ МэВ}$

Пример 7. Во сколько раз уменьшится активность препарата  ${}^{32}_{15}\text{P}$  через время  $t = 40$  суток?

Дано:



$T_{1/2} = 14,3 \text{ сут.} = 1235520 \text{ с}$

$t = 40 \text{ сут.} = 3,456 \cdot 10^6 \text{ с}$

$$\frac{A_0}{A} = ?$$

Решение

Активность изотопа

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Из закона радиоактивного распада

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

имеем, произведя дифференцирование,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Таким образом,  $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$  в любой момент времени  $t$ .

При  $t = 0$   $A_0 = \lambda N_0$ .

Разделим эти соотношения друг на друга.

$$\frac{A_0}{A} = \frac{\lambda N_0}{\lambda N_0 e^{-\lambda t}} = e^{\lambda t}$$

Определяем  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{1235520} = 5,6 \cdot 10^{-7}$$

$$\frac{A_0}{A} = e^{5,6 \cdot 10^{-7} \cdot 3,456 \cdot 10^6} = 6,96$$

Ответ: активность уменьшится в 7 раз.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить энергию  $\varepsilon$ , массу  $m$  и импульс  $p$  фотона с длиной волны  $\lambda = 1,24 \text{ нм}$ .

Ответ:  $1,60 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$ ;  $1,78 \cdot 10^{-33} \text{ кг}$ ;  $5,35 \cdot 10^{-25} \text{ кг}\cdot\text{м/с}$

2. На пластинку падает монохроматический свет ( $\lambda = 0,42 \text{ мкм}$ ). Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U = 0,95 \text{ В}$ . Определить работу  $A$  выхода электронов с поверхности пластины.

Ответ: 2 эВ



3. На цинковую пластину падает пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,2$  мкм). Определить максимальную кинетическую энергию  $T_{\max}$  и максимальную скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов.

Ответ: 2,2 эВ;  $8,8 \cdot 10^5$  м/с

4. Определить максимальную скорость  $v_{\max}$  фотоэлектрона, вырванного с поверхности металла  $\gamma$ -квантом с энергией  $\varepsilon = 1,53$  МэВ.

Ответ:  $2,91 \cdot 10^8$  м/с

5. Определить энергию  $\varepsilon$  фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.

Ответ: 12,1 эВ

6. Определить первый потенциал возбуждения  $\varphi_1$  атома водорода.

Ответ: 10,2 В

7. Определить число  $N$  атомов радиоактивного препарата иода  ${}^{131}_{53}I$  массой  $m=0,5$  мкг, распавшихся в течение времени : 1)  $t_1=1$  мин; 2)  $t_2=7$  суток.

Ответ:  $1,38 \cdot 10^{11}$ ;  $1,04 \cdot 10^{15}$

8. Определить активность  $A$  радиоактивного препарата  ${}^{98}_{38}Sr$  массой  $m=0,1$  мкг.

Ответ: 543 кБк

9. Вычислить энергию связи  $E_{св}$  ядра дейтерия  ${}^2_1H$  и трития  ${}^3_1H$ .

Ответ: 2,22 МэВ; 8,47 МэВ

10. Вычислить энергетический эффект  $Q$  реакции  ${}^9_4Be + {}^4_2He \rightarrow {}^{12}_6C + {}^1_0n$ .

Ответ: 5,71 МэВ

11. Вычислить энергетический эффект  $Q$  реакции  ${}^6_3Li + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^4_2He$ .

Ответ: 4,03 МэВ

Задачи к контрольной работе

391. Красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_0=310$  нм. Определить максимальную кинетическую энергию  $T_{\max}$  фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинк падает свет с длиной волны  $\lambda=200$  нм.

392. На поверхность калия падает свет с длиной волны  $\lambda=150$  нм. Определить максимальную кинетическую энергию  $T_{\max}$  фотоэлектронов.

393. Фотон с энергией  $\varepsilon = 10$  эВ падает на серебряную пластину и вызывает фотоэффект. Определить импульс  $p$ , полученный пластиной, если принять, что направления движения фотона и фотоэлектрона лежат на одной прямой, перпендикулярной поверхности пластин.

394. На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны  $\lambda=200$  нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов  $U_{\min}$ , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

395. Какова должна быть длина волны  $\gamma$ -излучения, падающего на платиновую пластину, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была  $v_{\max}=3$  Мм/с?

396. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,25$  мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов  $U_{\min}=0,96$  В. Определить работу выхода  $A$  электронов из металла.

397. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda=0,1$  мкм. Красная граница фотоэффекта  $\lambda_0=0,3$  мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии?

398. На металл падает рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda=1$  нм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов.

399. На металлическую пластину направлен монохроматический пучок света с частотой  $\nu = 7,3 \cdot 10^{14}$  Гц. Красная граница  $\lambda_0$  фотоэффекта для данного металла равна 560 нм. Определить максимальную скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов.

400. На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U=1,5$  В. Определить длину волны  $\lambda$  света, падающего на пластину.

401. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны  $\lambda=102,6$  нм. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус  $r$  электронной орбиты возбужденного атома водорода.

402. Вычислить по теории Бора радиус  $r_2$  второй стационарной орбиты и скорость  $v_2$  электрона на этой орбите для атома водорода.

403. Вычислить по теории Бора период  $T$  вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом  $n=2$ .

404. Определить изменение энергии  $\Delta E$  электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с частотой  $\nu = 6,28 \cdot 10^{14}$  Гц.

405. Во сколько раз изменится период  $T$  вращения электрона в атоме водорода, если при переходе в невозбужденное состояние атом излучил фотон с длиной волны  $\lambda=97,5$  нм?

406. На сколько изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны  $\lambda = 435$  нм?

407. В каких пределах  $\Delta\lambda$  должна лежать длина волн монохроматического света, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света радиус  $r_n$  орбиты электрона увеличился в 16 раз?

408. В однозарядном ионе лития электрон перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить длину волны  $\lambda$  излучения, испущенного ионом лития.

409. Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определить кинетическую  $T$ , потенциальную  $П$  и полную  $E$  энергию электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

410. Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией  $T=10$  эВ. Определить энергию  $\varepsilon$  фотона.

411. Найти период полураспада  $T_{1/2}$  радиоактивного изотопа, если его активность за время  $t=10$  суток уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной.

412. Определить, какая доля радиоактивного изотопа  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  распадается в течение времени  $t=6$  суток.

413. Активность  $A$  некоторого изотопа за время  $t=10$  суток уменьшилась на 20%. Определить период полураспада  $T_{1/2}$  этого изотопа.

414. Определить массу  $m$  изотопа  ${}^{131}_{53}\text{I}$ , имеющего активность  $A=37$  ГБк.

415. Найти среднюю продолжительность жизни  $\tau$  атома радиоактивного изотопа кобальта  ${}^{60}_{27}\text{Co}$ .

416. Счетчик  $\alpha$ -частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал  $N_1=1400$  частиц в минуту, а через время  $t = 4$  часа - только  $N_2 = 400$ . Определить период полураспада  $T_{1/2}$  изотопа.

417. Во сколько раз уменьшится активность изотопа  ${}^{32}_{15}\text{P}$  через время  $t=20$  суток?

418. На сколько процентов уменьшится активность изотопа иридия  ${}^{192}_{77}\text{Ir}$ , время  $t=15$  суток?

419. Определить число  $N$  ядер, распадающихся в течение времени:  
1)  $t_1=1$  мин, 2)  $t_2=5$  суток, - в радиоактивном изотопе фосфора  ${}^{32}_{15}\text{P}$  массой  $m=1$  мг.

420. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада  $T_{1/2}$  изотопа.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1

Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение
1	2	3
Элементарный заряд	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$R$	$1,097 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> К <sup>4</sup> )
Постоянная закона смещения Вина	$b$	$2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
Радиус Бора	$a_0$	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Таблица 2

Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление Ом·м	Металл	Удельное сопротивление Ом·м
1	2	3	4
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$

Таблица 3

## Энергия ионизации

Вещество	$E_i$ , Дж	$E_i$ , эВ
1	2	3
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

Таблица 4

Подвижность ионов в газах,  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ 

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
1	2	3
Азот	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
Водород	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$
Воздух	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$

Таблица 5

## Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
1	2	3	4
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,5

Таблица 6

## Работа выхода электронов

Металл	$A$ , Дж	$A$ , эВ
1	2	3
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Платина	$10 \cdot 10^{-19}$	6,3
Рубидий	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цезий	$3,2 \cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

Таблица 7

## Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период
1	2	3
Актиний	${}_{89}^{225}Ac$	10 суток
Кобальт	${}_{27}^{60}Co$	5,3 года
Магний	${}_{12}^{27}Mg$	10 минут
Радий	${}_{86}^{226}Ra$	1620 лет
Радон	${}_{86}^{222}Rn$	3,8 суток
Йод	${}_{53}^{131}I$	8 суток
Стронций	${}_{38}^{90}Sr$	27 лет
Фосфор	${}_{15}^{32}P$	14,3 суток
Церий	${}_{58}^{144}Ce$	285 суток

Таблица 8

Масса и энергия покоя некоторых элементарных частиц и легких ядер

Частица	$m_0$		$E_0$	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный $\pi$ -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-11}$	135

Таблица 9

Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса а.е.м.
Нейтрон	${}_0^1n$	1,00867	Бериллий	${}_4^7Be$	7,01693
				${}_4^9Be$	9,01219
Водород	${}_1^1H$ ${}_1^2H$ ${}_1^3H$	1,00783 2,01410 3,01605	Бор	${}_5^{10}B$	10,01294
				${}_5^{11}B$	11,00930
Гелий	${}_2^3He$ ${}_2^4He$	3,01603 4,00260	Углерод	${}_6^{12}C$	12,00000
				${}_6^{13}C$	13,00335
				${}_6^{14}C$	14,00324
Литий	${}_3^6Li$ ${}_3^7Li$	6,01513 7,01601	Азот	${}_7^{14}N$	14,00307
			Кислород	${}_8^{16}O$	15,99491



				$^{17}_8O$	16,99913
--	--	--	--	------------	----------

Таблица 10

Единицы СИ, имеющие специальные наименования

Величины		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражение через основные и дополнительные единицы
1	2	3	4	5
<i>Основные единицы</i>				
Сила электрического тока	I	ампер	A	
Сила света	J	кандела	K	
<i>Производные единицы</i>				
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	Ом	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	Сименс	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Магнитный поток	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл	$kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм	кд · ср
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность изотопа (активность нуклида в радиоактивном)				

источнике)	$T^{-1}$	беккерель	Бк	$c^{-1}$
------------	----------	-----------	----	----------

## СОДЕРЖАНИЕ

Рабочая программа по физике для студентов-заочников третьего курса обучения. Часть 3	3
Рекомендуемая литература	6
Контрольная работа №3. Таблица вариантов	7
3.1 Постоянный электрический ток.	
Основные формулы	7
Примеры решения задач	10
Задачи для самостоятельного решения	17
Задачи к контрольной работе	18
3.2 Электромагнетизм.	
Основные формулы	21
Примеры решения задач	25
Задачи для самостоятельного решения	40
Задачи к контрольной работе	43
3.3 Оптика.	
Основные формулы	50
Примеры решения задач	53
Задачи для самостоятельного решения	57
Задачи к контрольной работе	59
3.4 Фотоэффект, атомная и ядерная физика.	61
3.4.1 Фотоэффект. Основные формулы	61
3.4.2 Атом водорода по теории Бора. Основные формулы	62
3.4.3 Физика атомного ядра. Радиоактивность. Ядерные реакции. Основные формулы	63
Примеры решения задач	65

Задачи для самостоятельного решения	71
Задачи к контрольной работе	72
Приложения	76

### Вопросы к экзамену

1. Способы задания движения материальной точки (векторный, координатный, естественный).
2. Скорость материальной точки. Мгновенная, средняя скорость движения. Кинематическое уравнение при неравномерном и равномерном движении.
3. Ускорение материальной точки. Мгновенное, среднее ускорение движения.
4. Движение материальной точки по окружности. Нормальное и тангенциальное ускорение. Вращательное движение. Кинематическое уравнение движения.
5. Мгновенная, средняя угловая скорость. Закон движения при равномерном и неравномерном движении. Направление вектора скорости.
6. Мгновенное и среднее угловое ускорение движения. Направление вектора ускорения.
7. Связь линейных и угловых величин.
8. Динамика поступательного движения. Закон инерции. Инерциальные системы отсчета. Основной закон динамики поступательного движения (II закон Ньютона). Принцип независимости действия сил. Закон действия и противодействия.
9. Силы трения в природе. Привести примеры.
10. Импульс. Закон сохранения импульса.
11. Энергия. Закон сохранения энергии.
12. Потенциальная и кинетическая энергия.
13. Работа при перемещении тела, мощность, единицы измерения.
14. Абсолютно упругий и неупругий удары.
15. Абсолютно твёрдое тело. Момент инерции тела. Теорема Штейнера.
16. Вращающий момент. Основной закон динамики вращательного движения.
17. Момент импульса тела. Закон сохранения момента импульса.
18. Кинетическая энергия вращения.
19. Колебательный процесс. Виды колебаний. Гармонические колебания, уравнение, определение всех составляющих.
20. Собственные колебания, дифференциальное уравнение.
21. Свободные колебания, дифференциальное уравнение, логарифмический декремент затухания, физический смысл.
22. Вынужденные колебания, дифференциальное уравнение. Явление резонанса. Сложение колебаний.
23. Механика жидкости. Уравнение неразрывности струи. Закон Паскаля. Закон Архимеда.
24. Уравнение Бернулли.

25. Основы МКТ. Идеальный газ. Температура. Термометры, виды термометров.
26. Изотермический процесс. Уравнения, диаграммы. Получение процесса.
27. Изобарический процесс. Уравнения, диаграммы. Получение процесса.
28. Изохорический процесс. Уравнения, диаграммы.
29. Закон Дальтона. Парциальное давление. Получение процесса.
30. Объединенный газовый закон. Закон Авогадро. Уравнение Менделеева-Клапейрона.
31. Скорость поступательного движения молекул. Опыт Штерна. Вероятная, среднеквадратичная, средняя арифметическая скорость движения молекул.
32. Среднее число столкновений молекул, средняя длина свободного пробега молекул.
33. Явления переноса. Теплопроводность, уравнение Фурье.
34. Явления переноса. Диффузия, уравнение Фика.
35. Явления переноса. Вязкость, уравнение Ньютона.
36. Поверхностное натяжение жидкости. Добавочное давление. Формула Лапласа. Явление смачивания и несмачивания. Полное смачивание. Формула Борелли-Жюрена.
37. Число степеней свободы. Внутренняя энергия массы вещества.
38. Теплоёмкости газа. Молярная и удельная теплоёмкости.
39. Физический смысл молярной газовой постоянной. Уравнение Майера.
40. Основы термодинамики. Условия существования обратимого процесса. Первое начало термодинамики.
41. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.
42. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона, диаграмма. Получение процесса. Ответить на вопрос: почему адиабата круче изотермы?
43. Второе начало термодинамики. Круговой процесс (цикл). Термический коэффициент.
44. Тепловые машины и холодильники. Цикл Карно. Энтропия. Положения Клаузиуса.
45. Электростатика. Способы электризации тел. Электрические заряды, единицы измерения. Взаимодействие зарядов в вакууме, в веществе. Закон сохранения заряда
46. Закон Кулона для вакуума, вещества. Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$ , физический смысл, единицы измерения.
47. Электрический диполь. Момент диполя, единицы измерения. Напряженность на продолжении оси диполя. Напряженность поля на перпендикуляре, восстановленном на оси из его середины.
48. Электрическое поле, его изображение, характеристики, единицы измерения. Напряженность электрического поля, физический смысл, единицы измерения. Потенциал поля, физический смысл, единицы измерения.
49. Теорема Остроградского - Гаусса. Линейная, поверхностная, объемная плотность зарядов, единицы измерения.

50. Работа по перемещению заряда в электрическом поле.
51. Эквипотенциальные линии. Доказательство перпендикулярности силовых и эквипотенциальных линий.
52. Напряженность заряженной нити. Напряженность заряженной плоскости. Напряженность между заряженными плоскостями.
53. Проводники, полупроводники, диэлектрики. Электропроводность полупроводников.
54. Электроемкость, единицы измерения. Электроемкость плоского конденсатора. Соединение конденсаторов, нахождение общей электроемкости при последовательном соединении. Соединение конденсаторов, нахождение общей электроемкости при параллельном соединении. Энергия электрического поля.
55. Постоянный электрический ток, единицы измерения. ЭДС, падение напряжения в цепи. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для замкнутого контура.
56. Сопротивление проводника, от чего оно зависит.
57. Соединение проводников, нахождение общего сопротивления при последовательном соединении проводников.
58. Соединение проводников, нахождение общего сопротивления при параллельном соединении.
59. Зависимость сопротивления проводника от температуры, закон, диаграмма. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры, закон, диаграмма.
60. Правила Кирхгофа
61. Термоэлектрические явления, термопара, контактная разность потенциалов, от чего она зависит. Физический смысл постоянной термопары, термоэлектрический эффект. Законы Вольты. Эффект Пельтье.
62. Основы электронной теории проводимости металлов и недостатки этой теории.
63. Магнитное поле, его изображение, характеристики поля. Магнитная индукция, физический смысл, определение направления вектора магнитной индукции.
64. Сила Ампера, закон Ампера, определение направления силы Ампера.
65. Сила Лоренца, частные случаи движения заряженных частиц в магнитном поле.
66. Взаимодействие проводников с током в магнитном поле. Сила взаимодействия проводников в магнитном поле.
67. Закон Био-Савара-Лапласа. Напряженность (индукция) магнитного поля в центре кругового проводника с током.
68. Индукция магнитного поля конечного проводника с током
69. Индукция магнитного поля бесконечного проводника с током.
70. Магнитное поле соленоида, тороида.
71. Магнитный поток, единицы измерения. Теорема Гаусса для магнитного поля.

72. Работа по перемещению проводника в магнитном поле.
73. Диамагнетики. Парамагнетики. Ферромагнетики, применение ферромагнетиков, петля гистерезиса.
74. Опыты Фарадея, выводы. Закон Фарадея, физ. смысл знака «-».
75. Обобщенный закон Ома.
76. Индуктивность, единицы измерения, физический смысл.
77. Энергия магнитного поля. Плотность магнитного поля.
78. Колебательный контур, вращающийся в магнитном поле.
79. Индуктивное, ёмкостное сопротивление, физический смысл.
80. Свободные, вынужденные колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания, физический смысл.
81. Закон отражения света. Изобразить падающий, преломленный, отраженный лучи.
82. Относительный показатель преломления света, единицы измерения.
83. Абсолютный показатель преломления света, единицы измерения
84. Закон преломления света.
85. Явление полного внутреннего отражения. Волоконная оптика.
86. Дисперсия света. Виды спектров.
87. Тонкие линзы. Формула тонкой линзы.
88. Явление поглощения света. Закон Бугера.
89. Фотометрические величины (поток излучения, сила света, яркость, освещенность). Единицы измерения. Закон освещенности.
90. Монохроматичность и когерентность света.
91. Явление интерференции света. Поперечные, продольные волны. Условие максимума интерференции в отраженном свете.
92. Условие минимума интерференции в отраженном свете.
93. Принцип Гюйгенса - Френеля. Ширина интерференционной полосы.
94. Частные случаи интерференции света. Интерференция света от плоскопараллельной пластины в проходящем и отраженном свете,
95. Частные случаи интерференции света. Кольца Ньютона,
96. Частные случаи интерференции света. Интерференция в клине. Применение интерференции. Просветление оптики.
97. Явление дифракции света. Условие наблюдения дифракции.
98. Дифракционная решетка. Применение дифракционной решетки.
99. Условие максимума дифракции, постоянная дифракционной решетки.
100. Явление поляризации света. Естественный, поляризованный свет.
101. Вращение плоскости поляризации. Закон Малюса. Оптически активные вещества.
102. Анизотропные вещества. Двойное лучепреломление света. Призма Николя. Поляроиды. Закон Брюстера.
103. Абсолютно черное тело. Серое тело. Тепловое излучение. Характеристики теплового излучения, единицы измерения.
104. Закон Кирхгофа для теплового излучения.
105. Закон Стефана-Больцмана. Закон смещения Вина. Формула Планка.

106. Применение законов теплового излучения. Оптическая пирометрия.
107. Явление фотоэффекта. Виды фотоэффекта. Законы фотоэффекта. Применение фотоэффекта.
108. Фотон, импульс фотона, масса покоя фотона, квант энергии.
109. «Красная граница фотоэффекта». Уравнение Эйнштейна. Фотоэлементы. Виды, применение фотоэлементов. Корпускулярно-волновой дуализм света.