

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Московский государственный университет  
геодезии и картографии (МИИГАиК)**

Заочный факультет

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**ПРОГРАММА И КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ №3 и №4**

По курсу

## **ФИЗИКА**

Электромагнетизм

Геометрическая и волновая оптика

Квантовая оптика

Атомная и ядерная физика

**Подлежит возврату в деканат  
заочного факультета**

**Для студентов II курса всех специальностей**

**МОСКВА 2005**

Веровочкин Ю.Г., Дунаенко Л.П., Падалка Н.М., Скорохватов Н.А.,  
Феофилактова Т.В.

Методические указания, программа и контрольные работы №3 и  
№4 по курсу «Физика», -М.: изд. 2005.

Методические указания написаны в соответствии с  
утвержденной программой курса «Физика», рекомендованы кафедрой  
физики и методической комиссией заочного факультета, утверждены к  
изданию редакционно-издательской комиссией факультета оптического  
приборостроения.

Методические указания содержат рабочую программу курса  
физики, примеры решения задач и контрольные работы №3 и №4, а  
также необходимые сведения для выполнения и оформления  
контрольных работ.

Рис. 26 , прил. 5 , библиография 2 назв.

Рецензенты: доц. Малинникова Е.В., МГУГиК  
доц. Воронина Е.В., МГУ

---

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по физике для студентов 2 курса заочного факультета ставят своей целью ознакомить студентов-заочников МИИГАиК с порядком выполнения учебного плана по курсу физики и содержат варианты домашних контрольных работ №3 и №4. В данных указаниях приведены: рабочая программа по физике для студентов 2 курса, основная и дополнительная литература, указания к выполнению и оформлению контрольных работ, примеры решения задач, контрольные работы №3 и №4, справочные таблицы. Согласно учебным планам заочного факультета МИИГАиК студенты всех специальностей изучают физику на первом и втором курсах.

На втором курсе изучают разделы физики.

1. Электричество и магнетизм.
2. Волновая оптика и квантовая физика.
3. Основы атомной и ядерной физики.

Студенты-заочники сдают по физике на 2 курсе зачет и экзамен.

**На зачете** необходимо представить отчет по лабораторным работам и проверенные преподавателем домашние контрольные работы. Студенты проходят **собеседование** по контрольным работам, на котором они должны проявить знания основных законов физики и умение их использовать при решении контрольных задач, **уметь решать задачи подобного типа**.

**На экзамене** студент должен показать знание основных физических законов и явлений, провести необходимые математические выводы и доказательства. Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса и задачу по различным разделам программы. Систематически в течение года преподавателями кафедры проводятся консультации. Иногородние студенты-заочники могут выяснить интересующие их вопросы путем переписки.

## УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Для получения глубоких и прочных знаний студент должен систематически изучать курс физики. Изучение должно сопровождаться кратким конспектированием основной учебной литературы. В рабочей тетради необходимо записывать законы и основные формулы, определения физических величин и единицы их измерения, дать чертежи. Для контроля знаний необходимо использовать рабочую программу по физике, пользоваться консультациями преподавателей и задавать вопросы в письменной форме.

К выполнению контрольных работ нужно приступать только после изучения теоретического материала.

В данных методических указаниях представлены примеры решения задач по всем разделам, заключенным в контрольных работах №3, №4. Каждый раздел завершается заданиями для самостоятельной работы, что должно помочь студентам-заочникам оценить, как усвоен изучаемый материал. «Методические указания к выполнению контрольных работ по курсу физики» студенты могут получить в деканате заочного факультета. Контрольные работы следует высылать на проверку каждую **в отдельной тетради**, последовательно в указанном порядке с тем, чтобы они были проверены **до начала экзаменационной сессии**. Контрольная работа выполняется

чернилами или шариковой ручкой в обычной школьной тетради, на обложке указывается фамилия, имя, отчество, шифр, курс и домашний адрес.

Условия задач в контрольной работе нужно переписывать полностью, для замечаний преподавателя на страницах тетради **оставляются поля**, В конце контрольной работы следует указать, каким учебником студент пользовался при изучении данного раздела физики. Высылать на рецензию следует одновременно **не более одной работы**. Если работа получает отрицательный отзыв, студент должен представить ее **на повторную рецензию**, включив в нее те задачи, решения которых оказались неверными. Повторная работа представляется вместе с незачтенной.

**В контрольной работе студент должен решить восемь задач того варианта, номер которого совпадает с последней цифрой его шифра.**

К решению задач следует приступать после тщательного изучения того или иного раздела курса физики. При решении задачи необходимо представлять себе, о каком физическом явлении сказано в задаче, и вспомнить законы, описывающие это явление.

Решения должны сопровождаться **подробными** пояснениями используемых физических законов. Если при решении задач применяется формула, полученная для частного случая, то ее следует **вывести**. Необходимо дать чертеж, поясняющий содержание задачи. Необходимо получить решение задачи в общем виде, затем подставить числовые значения величин, выраженных в единицах СИ, произвести вычисление искомых величин, затем, где целесообразно, оценить правдоподобность числового ответа. Вывести единицы измерения искомой величины, для чего в рабочую формулу вместо символов величин подставить обозначения единиц измерения и произвести с ними необходимые действия. В ответе записать числовое значение и сокращенное наименование единицы измерения искомой величины.

## **Рабочая программа по физике для студентов-заочников 2 курса.**

### Магнитное поле в вакууме.

Вектор индукции магнитного поля. Магнитный момент кругового тока. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле движущегося заряда. Магнитное поле прямого тока. Магнитное поле на оси кругового тока. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока для поля в вакууме. Магнитное поле соленоида и тороида. Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле. Закон Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Контур с током в магнитном поле. Магнитный поток. Теорема Гаусса-Остроградского для магнитного поля. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле.

### Магнитное поле в веществе.

Молекулярные токи. Вектор намагниченности. Вектор напряженности магнитного поля. Закон полного тока для магнетиков. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества. Магнитное поле на границе двух магнетиков. Классификация магнетиков. Магнитные моменты атомов и молекул. Элементарная теория диа- и парамагнетизма. Ферромагнетизм. Доменная структура ферромагнетиков. Гистерезис.

### Электромагнитная индукция.

Явление электромагнитной индукции. Токи Фуко. Потокосцепление. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при размыкании и замыкании цепи. Энергия магнитного поля. Объёмная плотность энергии магнитного поля. Энергия системы проводников с током. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной форме. Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме.

### Электромагнитные волны.

Волновое уравнение. Фазовая скорость. Плоская электромагнитная волна. Плотность потока энергии электромагнитной волны. Вектор Умова-Пойнтинга.

### Геометрическая оптика.

Законы преломления и отражения. Полное внутреннее отражение. Предельный угол полного внутреннего отражения. Отклонение луча в преломляющей призме и оптическом клине. Смещение луча в плоскопараллельной пластинке. Правило знаков для отрезков. Оптическая сила тонкой линзы. Построение изображений в тонкой линзе.

### Интерференция света.

Когерентность. Методы наблюдения интерференции. Условия минимума и максимума при интерференции. Связь разности фаз с оптической разностью хода. Интерференция в тонких пленках. Применение интерференции.

### Дифракция.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на щели. Дифракционная решетка. Угловая дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки. Понятие о голографии.

### Поляризация.

Виды поляризованного света. Закон Малюса. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Искусственная анизотропия. Ячейка Керра. Вращение плоскости поляризации. Взаимодействие света с веществом: дисперсия, поглощение и рассеяние.

### Квантовая физика.

Характеристики теплового излучения. Абсолютно чёрное тело. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина. Теория Планка теплового излучения. Законы внешнего фотоэффекта. Фотоны. Энергия фотонов. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Эффект Комптона. Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма материи. Дифракция электронов. Длина волны де Бройля. Волновые свойства микрочастиц и соотношение неопределённостей. Волновая функция, её статистический смысл. Уравнение Шредингера. Иллюстрация основных принципов квантовой механики на примере решения уравнения Шредингера для частицы в «потенциальной яме». Квантовые числа электрона в водородоподобном атоме и их физический смысл. Правила отбора. Спектры излучения водородоподобных систем. Понятие о спектрах излучения щелочных металлов. Спин электрона. Принцип Паули.

### Основы атомной и ядерной физики.

Состав ядра. Зарядовое и массовое числа. Дефект массы и энергия связи ядра. Свойства ядерных сил. Явление радиоактивности. Закон радиоактивного распада.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -распад ядер. Ядерные реакции и их энергетический эффект. Получение ядерной энергии при делении тяжёлых и синтезе лёгких ядер. Элементарные частицы: лептоны и кварки. Сильное, слабое электромагнитное и гравитационное взаимодействия.

### Литература:

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа. Все годы издания.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Изд. «Наука». Все годы издания.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №3

содержит задачи по следующим основным разделам физики:

- электричество и магнетизм,
- геометрическая и волновая оптика.

### Основные законы и формулы.

Связь магнитной индукции  $\vec{B}$  с напряженностью  $\vec{H}$  магнитного поля в вакууме:

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H},$$

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

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{\ell} \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad \text{или} \quad |d\vec{B}| = \frac{\mu_0 I \sin \alpha dl}{4\pi r^2},$$

где  $d\vec{B}$  – магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника длиной  $dl$  с током  $I$ ;  $d\vec{\ell}$  – вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленным в ту сторону, в которую течёт ток;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция;  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{\ell}$  и  $\vec{r}$ .

Магнитная индукция в центре кругового тока:

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

где  $R$  – радиус кругового витка.

Магнитная индукция на оси кругового тока:

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

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

Магнитная индукция поля прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0},$$

где  $r_0$  – кратчайшее расстояние от оси проводника до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком провода с током:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где  $r_0$  – кратчайшее расстояние от оси проводника до точки  $M$ , в которой определяется магнитная индукция;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, образуемые радиус-векторами  $\vec{R}_1$  и  $\vec{R}_2$ , проведенными из концов проводника к этой точке и самим проводником (рис. 1.1).

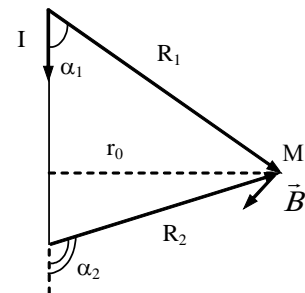


Рис.1.1

Магнитная индукция поля соленоида:

$$B = \mu_0 nI,$$

где  $l$  - отношение числа витков соленоида к его длине, т.е. число витков на единицу длины соленоида.

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

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

где  $\ell$  - длина проводника;  $\alpha$  - угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Это выражение справедливо для однородного магнитного поля и прямого отрезка проводника. Если поле неоднородно и проводник не является прямым, то закон Ампера можно применять к каждому элементу проводника в отдельности:

$$d\vec{F} = I[d\vec{\ell}\vec{B}]$$

Сила взаимодействия параллельных проводников с током:

$$|\vec{F}| = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell,$$

где  $d$  - расстояние между проводами.

Магнитный момент плоского контура с током:

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

где  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали (положительной) к плоскости контура;  $I$  - сила тока, протекающего по контуру;  $S$  - площадь контура.

Момент сил, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле:

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

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

Сила Лоренца:

$$\vec{F} = q[\vec{V}\vec{B}] \quad \text{или} \quad \vec{F} = qVB \sin \alpha,$$

где  $\vec{V}$  - скорость заряженной частицы;  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ .

Магнитный поток:

а) в случае однородного магнитного поля и плоской поверхности:

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

где  $S$  - площадь поверхности;  $\alpha$  - угол между нормалью к поверхности и вектором магнитной индукции;  $B_n$  - проекция вектора магнитной индукции на направление нормали.

б) в случае неоднородного поля и произвольной поверхности

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

(интегрирование ведется по всей поверхности).

Потокоцепление (полный поток):

$$\Psi = N\Phi$$

Эта формула верна для соленоида и тороида с равномерной намоткой плотно прилегающих друг к другу  $N$  витков.

Работа по перемещению замкнутого контура в магнитном поле:

$$A = I\Delta\Phi = I(\Phi_k - \Phi_n),$$

где  $\Phi_k$  - магнитный поток через контур в конце перемещения;  $\Phi_n$  - начальный магнитный поток через контур.

ЭДС индукции:

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



Разность потенциалов на концах проводника, движущегося со скоростью  $\vec{V}$  в однородном магнитном поле:

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

где  $\ell$  - длина проводника;  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ .

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока, пронизывающего площадь контура:

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

где  $R$  - сопротивление контура.

Индуктивность контура:

$$L = \frac{\psi}{I}$$

ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$

Индуктивность соленоида:

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

где  $n$  - число витков на единицу длины соленоида;  $V$  - объем соленоида,  $\mu$  - магнитная проницаемость сердечника.

Мгновенное значение силы тока в цепи, содержащей сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$ :

а)  $I = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$  (при замыкании цепи), где  $\varepsilon$  - ЭДС источника тока;  $t$  - время, прошедшее после замыкания цепи;

б)  $I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$  (при размыкании цепи), где  $I_0$  - сила тока в цепи при  $t = 0$ ;  $t$  - время, прошедшее с момента размыкания цепи.

Энергия магнитного поля:

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

Объемная плотность энергии магнитного поля:

$$W = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2},$$

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

Закон отражения света:

$$\varepsilon = \varepsilon'$$

Углы падения  $\varepsilon$  и отражения  $\varepsilon'$  являются углами между перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения луча, и соответственно падающим и отраженным лучами (рис.2.1).

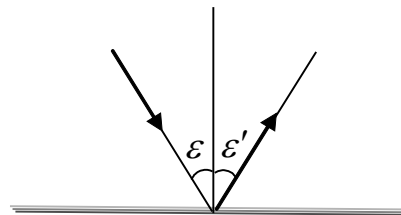


Рис. 2.1

Закон преломления света:

$$n_1 \sin \varepsilon_1 = n_2 \sin \varepsilon_2.$$

Здесь  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления первой и второй среды, а  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — соответственно угол падения и угол преломления, отсчитываемые от перпендикуляра к границе раздела двух сред (рис. 2.2).

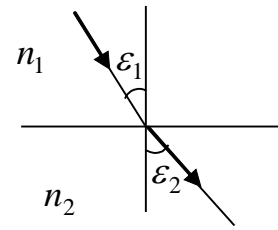


Рис. 2.2

Формула Гаусса:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}.$$

Здесь  $a$  — расстояние от линзы до предмета;  $a'$  — расстояние от линзы до изображения;  $f'$  — расстояние от линзы до ее заднего фокуса  $F'$  (рис. 2.3) (заднее фокусное расстояние). Все эти расстояния отсчитываются от линзы и могут быть как положительными, так и отрицательными в соответствии с правилом знаков для отрезков.

Правило знаков для отрезков: отрезки, отсчитываемые по направлению падающих на линзу (со стороны предмета) лучей, считаются положительными; против направления падающих на линзу лучей — отрицательными.

В представленном на рис. 2.3. случае  $a < 0$ ,  $a' > 0$ ,  $f' > 0$ . Если линза рассеивающая, то  $f' < 0$ .

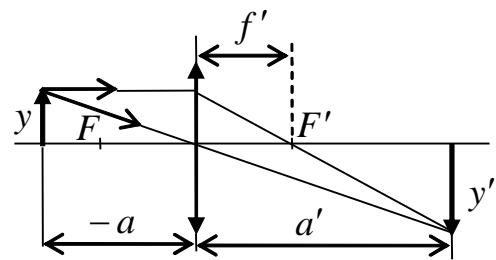


Рис. 2.3

Линейное увеличение линзы:

$$\beta = \frac{y'}{y},$$

где  $y'$  — величина изображения, а  $y$  — величина предмета.

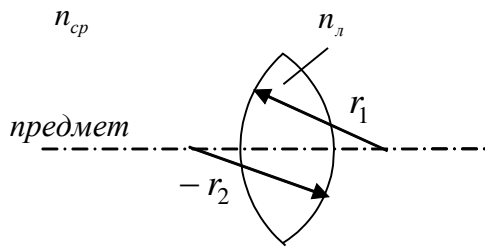
Можно показать, что  $\beta = \left| \frac{a'}{a} \right|$  (см. рис. 2.3).

Оптическая сила линзы:

$$D = \frac{1}{f'},$$

где  $f'$  — заднее фокусное расстояние.

Формула для вычисления заднего фокусного расстояния тонкой линзы:



$$\frac{1}{f'} = \left( \frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Рис. 2.4

Здесь  $n_l$  — показатель преломления линзы;  $n_{cp}$  — показатель преломления среды;  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы кривизны первой (со стороны предмета) и второй преломляющих поверхностей линзы.

При определении знака радиуса кривизны выбирается направление отсчета от поверхности к центру кривизны. Согласно правилу знаков для отрезков в представленном на рис.2.4 случае  $r_1 > 0$ ,  $r_2 < 0$ .

Оптическая длина пути световой волны, прошедшей через N разных сред:

$$S = \sum_{i=1}^N n_i x_i + \left( \frac{\lambda}{2} \right).$$

Здесь  $x_i$  — расстояние, пройденное волной в  $i$ -ой среде,  $n_i$  — показатель преломления  $i$ -ой среды,  $\lambda$  — длина волны в вакууме, а член  $\frac{\lambda}{2}$  добавляется при каждом отражении волны от границы раздела со средой оптически более плотной (имеющей больший показатель преломления  $n$ ).

Оптическая разность хода двух волн:

$$\Delta = S_2 - S_1.$$

Условие максимума интенсивности света при интерференции:

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

Условие минимума интенсивности света при интерференции:

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

Интерференция излучения двух точечных когерентных источников:

$$y_{\max} = \frac{\ell \lambda}{d} k \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots),$$

$$y_{\min} = \frac{\ell \lambda}{2d} (2k + 1) \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots).$$

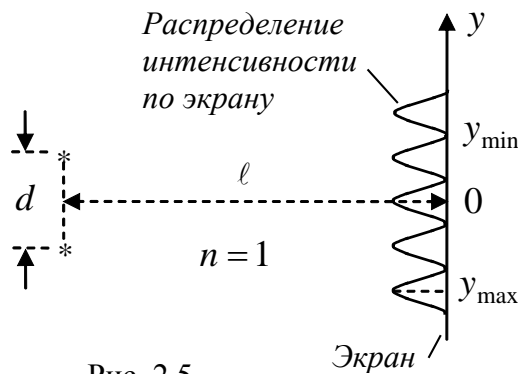


Рис. 2.5

Здесь  $y_{\max}$  и  $y_{\min}$  — соответственно координаты интерференционных максимумов (светлая полоса) и интерференционных минимумов (темная полоса) на экране при  $d \ll l$  (рис. 2.5),  $d$  — расстояние между источниками,  $l$  — расстояние от источников до экрана,  $\lambda$  — длина световой волны в вакууме.

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете:

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

где  $k$  — номер кольца ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );  $R$  — радиус кривизны выпуклой поверхности плосковыпуклой линзы;  $\lambda$  — длина световой волны в вакууме.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете:

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

Внешний радиус  $k^{\text{ой}}$  зоны Френеля в случае сферической волновой поверхности:

$$r_k = \sqrt{\frac{abk\lambda}{a+b}} \quad (k = 1, 2, 3, \dots).$$

Здесь  $b$  — расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения;  $a$  — расстояние от источника света до волновой поверхности,  $\lambda$  — длина световой волны в вакууме.

В случае плоской волновой поверхности  $r_k = \sqrt{bk\lambda}$ .

Условие появления минимумов интенсивности (темных полос) при дифракции плоской световой волны на длинной узкой щели:

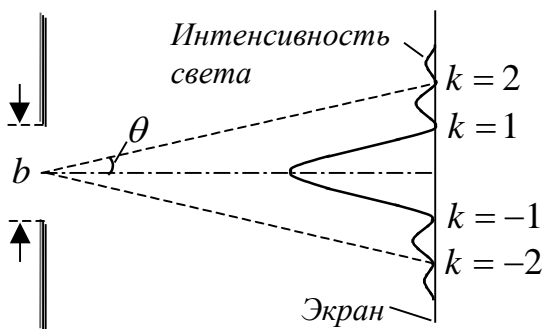


Рис. 2.6

$$b \sin \theta = k\lambda \quad (k \neq 0; k = \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Здесь  $b$  — ширина щели;  $k$  — номер минимума;  $\theta$  — угол дифракции света, соответствующий  $k^{\text{-му}}$  минимуму;  $\lambda$  — длина световой волны в вакууме (рис. 2.6).

Приведенное соотношение справедливо при нормальном падении света на щель, если

экран, на котором наблюдается дифракционная картина, находится достаточно далеко от щели (дифракция в параллельных лучах).

Условие появления главных максимумов (светлых полос) при дифракции плоской волны на дифракционной решетке:

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

Здесь  $k$  — порядок главного максимума (номер максимума);  $d$  — период дифракционной решетки;  $\theta$  — угол дифракции;  $\lambda$  — длина световой волны в вакууме.

Приведенное соотношение справедливо при нормальном падении света на дифракционную решетку, если экран, на котором наблюдается дифракционная картина, удален достаточно далеко от решетки (дифракция в параллельных лучах).

Разрешающая способность дифракционной решетки:

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

Здесь  $N$  — общее число щелей в дифракционной решетке, а  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$  — длины волн самых близких спектральных линий, которые в спектре  $k$ -го порядка еще видны раздельно.

Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_1 = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $\varepsilon_1$  — угол падения, при котором отражающийся от границы раздела двух диэлектриков свет полностью поляризован;  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления первой (в которой распространялся падающий свет) и второй сред.

Закон Малюса для плоскополяризованного света:

$$I = I_0(1 - K) \cos^2 \varphi.$$

Здесь  $I_0$  — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор (поляризатор, поляроид);  $I$  — интенсивность света, выходящего из анализатора (поляризатора, поляроида);  $\varphi$  — угол между направлением напряженности электрического поля в падающей световой волне и плоскостью пропускания анализатора (поляризатора, поляроида)<sup>1</sup>;  $K$  — коэффициент потерь света в анализаторе (поляризаторе, поляроиде).

---

<sup>1</sup> Если вектор  $\vec{E}$  в падающей световой волне перпендикулярен плоскости пропускания, то устройство не пропускает свет.

Закон Малюса для естественного света:

$$I = \frac{1}{2} I_{ест} (1 - K),$$

где  $I_{ест}$  — интенсивность естественного света, падающего на поляризатор (анализатор, поляроид).

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

а)  $\varphi = \alpha \ell$  (в твердых телах),

где  $\alpha$  — постоянная вращения, а  $\ell$  — длина пути, пройденного светом в оптически активной среде;

б)  $\varphi = [\alpha] C \ell$  (в растворах),

где  $[\alpha]$  — удельная постоянная вращения, а  $C$  — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

## Примеры решения задач.

**Задача 1.** По длинному прямому тонкому проводу течет ток силой  $I = 10$  А. Определить магнитную индукцию  $\vec{B}$  поля, создаваемого проводником в точке, удаленной от него на расстояние  $r = 10$  см.

**Решение.** Магнитное поле, создаваемое бесконечно длинным проводником малого сечения, обладает осевой симметрией. Это значит, что модуль вектора магнитной индукции в данной точке будет зависеть только от ее расстояния до проводника. Силовые линии магнитного поля будут представлять собой окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику, центры которых находятся на проводнике. Направление вектора магнитной индукции определяется по правилу правого винта (рис.1.2).

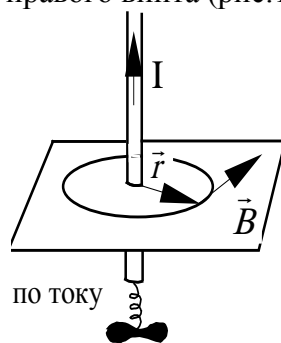


Рис.1.2

Величина вектора индукции магнитного поля для бесконечного проводника определяется:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0}$$

Произведем вычисления:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

**Задача 2.** Бесконечно длинный прямой проводник, по которому идет ток силой  $I = 5$  А, согнут под прямым углом (рис. 1.3). Найти индукцию магнитного поля на расстоянии  $a = 10$  см от вершины угла в точке, лежащей на биссектрисе прямого угла.

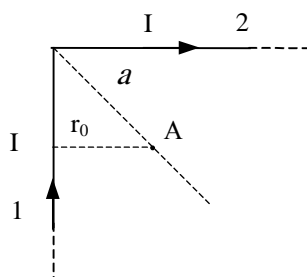


Рис.1.3

**Решение.** В любой точке индукция магнитного поля может быть найдена как векторная сумма индукции полей, созданных токами, протекающими по двум частям 1 и 2 провода  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$

Согласно условию проводник бесконечно длинный, что позволяет не учитывать магнитное поле, создаваемое подводными проводами, идущими к источнику. Абсолютное значение индукции магнитного поля в любой точке, создаваемой каждым из проводников, может быть найдено по формуле для отрезка прямого провода с током:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

В точке А (рис. 1.3), как следует из закона Био-Савара-Лапласа, векторы  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  направлены одинаково и перпендикулярны плоскости рисунка.

Следовательно,

$$B_A = B_{1A} + B_{2A}$$

Вследствие симметричного расположения точки относительно частей проводника

$$B_{1A} = B_{2A},$$

Поэтому

$$B_A = 2B_{1A}$$

Из рисунка 1.3 видно, что для точки А:

$$r_0 = a \cos \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} a;$$

$$\alpha_{1A} = 0, \quad \cos \alpha_{1A} = 1, \quad \alpha_{2A} = \frac{3\pi}{4}, \quad \cos \alpha_{2A} = -\frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Тогда

$$B_A = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi \frac{\sqrt{2}}{2} a} \left[ 1 - \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} \right) \right]$$

$$B_A = 2 \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 2}{4\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 0.1} \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right] = 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

**Задача 3.** К тонкому однородному проволочному кольцу радиуса  $r_0$  подводят ток  $I$ .

Подводящие провода, расположенные радиально, делят кольцо на две дуги, длины которых  $L_1$  и  $L_2$  (рис. 1.4). Найти индукцию магнитного поля в центре кольца.

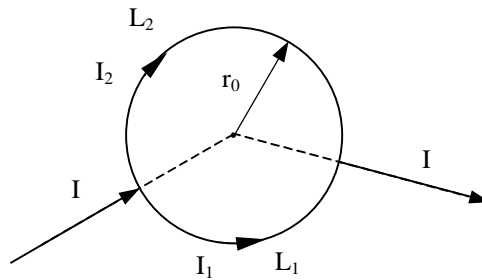


Рис.1.4

**Решение.** Магнитное поле создается токами  $I_1$  и  $I_2$ , текущими по дугам  $L_1$  и  $L_2$  кольца и током  $I$ , текущим по подводящим проводам:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_{np}$$

Каждое из слагаемых может, быть найдено на основании принципа суперпозиции и закона Био-Савара-Лапласа:

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

где  $d\vec{B}$  вектор магнитной индукции поля, созданного элементом тока  $I d\vec{l}$  в точке радиус-вектор которой  $\vec{r}$ .



Подводящие провода не создают поля в центре кольца, так как для любого элемента  $d\vec{l}$  этих проводов  $[Id\vec{l}\vec{r}] = 0$ . Векторы индукции  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  магнитных полей, созданных токами  $I_1$  и  $I_2$  в центре кольца, направлены перпендикулярно плоскости (рис. 1.4) и противоположны друг другу. Следовательно, искомая индукция магнитного поля в центре кольца

$$B = |B_1 - B_2|,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  могут быть найдены из закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции для каждой из дуг  $L_1$  и  $L_2$ .

Запишем в скалярном виде выражение для  $dB$ :

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

В центре кольца для всех точек каждой из дуг  $r = r_0$  и  $\alpha = \hat{d\vec{l}\vec{r}} = \frac{\pi}{2}$

Все элементарные  $d\vec{B}$  полей, созданных элементами дуги  $L_1$ , параллельны между собой и поэтому:

$$B_1 = \int_{(L_1)} dB = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi r_0^2} \int_0^{L_1} d\ell = \frac{\mu_0 I_1 L_1}{4\pi r_0^2}$$

Аналогично

$$B_2 = \int_{(L_2)} dB = \frac{\mu_0 I_2}{4\pi r_0^2} \int_0^{L_2} d\ell = \frac{\mu_0 I_2 L_2}{4\pi r_0^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r_0^2} |I_1 L_1 - I_2 L_2|$$

Соединение проводников параллельное; сопротивление каждого из них прямо пропорционально длине (по условию кольцо однородное). Это значит, что силы токов  $I_1$  и  $I_2$  обратно пропорциональны сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$  т.е, обратно пропорциональны длинам дуг  $L_1$  и  $L_2$ :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{L_2}{L_1}$$

Следовательно,  $I_1 L_1 = I_2 L_2$  и индукция магнитного поля в центре кольца  $B = 0$ .

**Задача 4.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 2$  Тл расположен тонкий проводник в виде полукольца радиуса  $R = 20$  см, по которому течет ток  $I = 1$  А. Вектор  $\vec{B}$  параллелен плоскости проводника. Определить силу, действующую на проводник.

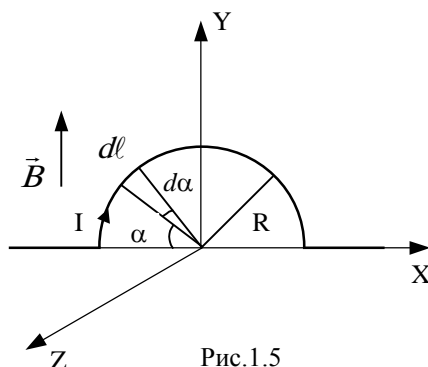


Рис.1.5

**Решение.** Непосредственно применить закон Ампера в виде  $F = I\ell B \sin \alpha$  нельзя, т.к. каждый элемент проводника расположен неодинаковым образом относительно магнитного поля. Разделим проводник на столь малые участки, чтобы каждый из них можно было

считать элементом тока. Рассмотрим один такой участок, длина которого равна  $d\ell$ . Модуль вектора элементарной силы, действующей на этот участок, по закону Ампера имеет вид:

$$dF = Id\ell B \sin \alpha$$

Все элементарные векторы  $d\vec{F}$  направлены вдоль оси Oz. Поэтому результирующую силу F можно найти интегрированием, учтя при этом, что  $d\ell = R d\alpha$ .

$$F = \int dF = \int_0^\pi IBR \sin \alpha d\alpha = IBR \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = IBR(-\cos \alpha) \Big|_0^\pi = IBR(\cos 0 - \cos \pi) = 2IBR$$

$$F = 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.2 = 0.8 \text{ Н}.$$

**Задача 5.** Прямой бесконечный ток  $I_1 = 5 \text{ А}$  и прямоугольная рамка с током  $I_2 = 3 \text{ А}$  расположены в одной плоскости так, что сторона рамки  $\ell = 1 \text{ м}$  параллельна прямому току и отстоит от него на расстояние  $r = 0,1b$ , где  $b$  - длина другой стороны рамки (рис.1.6).

Определить, какую работу необходимо совершить для того, чтобы повернуть рамку на угол  $\alpha = 90^\circ$  относительно оси  $OO_1$  параллельной прямому току и проходящей через середины противоположных сторон рамки.

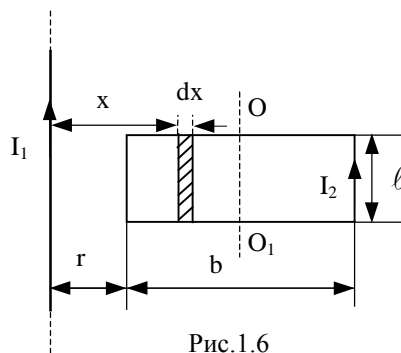


Рис.1.6

**Решение.** Работа внешних сил по перемещению контура с током в магнитном поле равна  $A = I(\Phi_1 - \Phi_2)$ ,

где  $\Phi_1$  - магнитный поток, пронизывающий контур до перемещения;  $\Phi_2$  - после перемещения.

Во втором положении магнитный поток через рамку равен нулю:  $\Phi_2 = 0$ . Необходимо рассчитать первоначальный магнитный поток  $\Phi_1$ . Так как поле прямого бесконечного тока  $I_1$  является, неоднородным, то найдем вначале элементарный поток. Для этого разделим площадь рамки на столь узкие полосы, чтобы в пределах каждой такой полосы магнитное поле можно было бы приближенно считать однородным. Рассмотрим одну такую полосу шириной  $dx$  (рис.1.6), находящуюся на расстоянии  $x$  от прямого тока  $I_1$ . Элементарный магнитный поток через эту полосу равен:

$$d\Phi = BdS = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi x} \ell dx$$

Отсюда после интегрирования по всей площади рамки находим магнитный поток:

$$\Phi_1 = \int_{(S)} d\Phi = \int_{0.1b}^{0.1b+b} \frac{\mu_0 I_1 \ell}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I_1 \ell}{2\pi} \ln \frac{0.1b+b}{0.1b} = \frac{\mu_0 I_1 \ell}{2\pi} \ln 11$$

Таким образом, работа равна:

$$A = I_2(\Phi_1 - \Phi_2) = I_2 \Phi_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi} \ln 11$$

$$A = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 3 \cdot 1}{2\pi} \ln 11 \approx 7.1 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}.$$

**Задача 6.** На проволочный виток радиусом  $r = 10 \text{ см}$ , помещенный между полюсами магнита, действует максимальный момент сил  $M = 6.5 \text{ мкН}\cdot\text{м}$ . Сила тока в витке  $I = 2 \text{ А}$ . Определить

магнитную индукцию  $B$  поля между полосами магнита. Действием магнитного поля Земли пренебречь.

**Решение.** Индукцию  $B$  магнитного поля можно определить из выражения механического момента  $M$ , действующего на виток с током в магнитном поле

$$|\vec{M}| = P_m B \sin \alpha,$$

где  $P_m$  - магнитный момент витка с током;  $B$  - индукция магнитного поля;  $\alpha$  - угол между направлением индукции магнитного поля и нормали к плоскости витка.

Если учесть, что максимальное значение момент сил принимает при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  ( $\sin \alpha = 1$ ), а

также что магнитный момент витка с током равен:  $P_m = IS$ , то формула примет вид:

$$M = IB S$$

Отсюда, учитывая, что  $S = \pi r^2$ , находим

$$B = \frac{M}{\pi r^2 I}$$

Подставим числовые значения в формулу:

$$B = \frac{6.5 \cdot 10^{-6}}{3.14 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 1.04 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} = 104 \text{ мкТл.}$$

**Задача 7.** Электрон, обладающий скоростью  $V = 2$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле индукцией  $B = 30$  мТл под углом  $\alpha = 30^\circ$  к направлению линий поля. Определить радиус  $R$  и шаг винтовой линии  $h$ , по которой будет двигаться электрон.

**Решение.** Известно, что на заряженную частицу, влетевшую в магнитное поле, действует сила Лоренца, перпендикулярная вектору магнитной индукции и вектору скорости частицы:

$$F = eVB \sin \alpha,$$

где  $e$  - заряд частицы.

Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна к скорости, то величина скорости не будет изменяться под действием этой силы. Но при постоянной скорости, как это следует из приведенной выше формулы, будет оставаться постоянной и величина силы Лоренца. Из курса механики известно, что постоянная сила, перпендикулярная к скорости, вызывает движение по окружности. Следовательно, электрон, влетевший в магнитное поле, будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной к полю, со скоростью, равной поперечной составляющей скорости  $V_z$  (рис.1.7); одновременно он будет двигаться и вдоль поля со скоростью  $V_x$ :

$$V_z = V \sin \alpha, \text{ и } V_x = V \cos \alpha$$

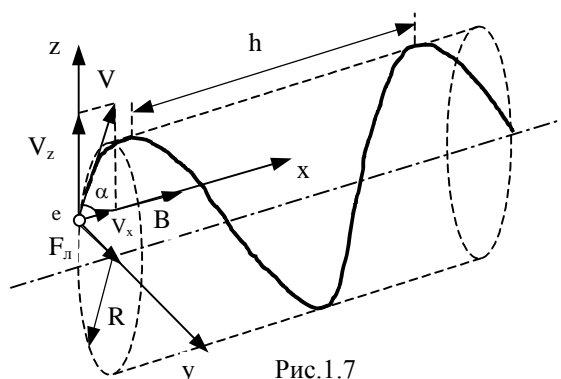


Рис.1.7

В результате одновременного движения по окружности и по прямой электрон будет двигаться по винтовой линии.

Определим радиус и шаг винтовой линии.

Радиус окружности, по которой движется электрон, найдем из второго закона Ньютона. Сила Лоренца  $F_L$  вызывает движение по окружности, сообщая электрону нормальное ускорение:

$$m\vec{a}_n = \vec{F}_L$$

Это уравнение проектируем на ось ОУ:

$$\frac{mV_z^2}{R} = F_L$$

Подставив  $V_z$  и силу Лоренца, получим:

$$\frac{mV^2 \sin^2 \alpha}{R} = eBV \sin \alpha$$

Решив полученное уравнение относительно R, найдем:

$$R = \frac{mV \sin \alpha}{eB}$$

Подставим числовые значения в формулу и произведем вычисления:

$$R = \frac{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^6 \cdot 0.5}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.03} \text{ м} = 1.9 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 1.9 \text{ см}$$

Шаг винтовой линии будет равен пути, пройденному электроном вдоль поля со скоростью  $V_x$  за время, которое понадобится электрону для того, чтобы совершить один оборот по окружности:

$$h = V_x T,$$

где T - период обращения электрона:

$$T = \frac{2\pi R}{V_z}$$

Подставив это выражение в формулу, найдем

$$h = \frac{2\pi R V_x}{V_z} \text{ или } h = \frac{2\pi R V \cos \alpha}{V \sin \alpha} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha$$

Подставив в эту формулу числовые значения величин, получим:

$$h = 2 \cdot 3.14 \cdot 1.9 \cdot 10^{-2} \cdot 1.73 \text{ м} = 0.206 \text{ м} = 20.6 \text{ см}$$

**Задача 8.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$  равномерно вращается рамка, содержащая  $N = 1000$  витков. Площадь рамки  $S = 150 \text{ см}^2$ . Рамка вращается с частотой  $n = 10$  об/с. Определить мгновенное значение ЭДС, соответствующее углу поворота рамки в  $30^\circ$ .

**Решение.** Мгновенное значение ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея-Максвелла:

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

где  $\psi$  - потокосцепление.

Потокосцепление  $\psi$  связано с магнитным потоком  $\Phi$  соотношением:  $\psi = N\Phi$ , где N – число витков, пронизываемых магнитным потоком  $\Phi$ .

Тогда получим:

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

При вращении рамки магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку в момент времени t, изменяется по закону:

$$\Phi = BS \cos \omega t,$$

где  $B$  - магнитная индукция;  $S$  - площадь рамки;  $\omega$  - круговая (или циклическая) частота;  $\omega t$  - мгновенное значение угла между нормалью  $\vec{n}$  к плоскости рамки и вектором индукции  $\vec{B}$ .

Подставив в формулу ЭДС магнитный поток, найдем мгновенное значение ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t$$

Круговая частота  $\omega$  связана с числом оборотов в секунду соотношением  $\omega = 2\pi n$

Подставляя значение  $\omega$ , получим:

$$\varepsilon_i = 2\pi nNBS \sin \omega t$$

Подставим числовые значения в полученную формулу ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = 2.3 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0.1 \cdot 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \text{ В} = 47.1 \text{ В}$$

**Задача 9.** Если сила тока, проходящая в некотором соленоиде, изменяется на 50 А в секунду, то на концах соленоида возникает среднее значение ЭДС самоиндукции, равное 0.08 В.

Найти индуктивность соленоида.

**Решение.** Индуктивность численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей на концах соленоида, когда ток, проходящий через соленоид, равномерно изменяется на единицу силы тока в единицу времени. Математически это выражается известным законом Фарадея-Максвелла, примененным к ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_s = -\frac{\Delta \psi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}$$

Вынося постоянную величину за знак приращения, получим

$$\varepsilon_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Знак «минус» показывает направление ЭДС самоиндукции. При равномерном изменении

тока в контуре  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \text{const}$  независимо от интервала времени  $\Delta t$ . Если ток в контуре

изменяется по произвольному закону, то  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  выражает среднее значение скорости изменения

тока за данный интервал времени  $\Delta t$ . Тогда  $L \frac{\Delta I}{\Delta t}$  будет выражать собой среднее значение

$\langle \varepsilon_s \rangle$  ЭДС самоиндукции за тот же интервал времени

$$\langle \varepsilon_s \rangle = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Знак «минус» в этом выражении опущен, т.к. направление ЭДС в данном случае несущественно. Отсюда находим интересующее нас выражение для индуктивности:

$$L = \frac{\langle \varepsilon_s \rangle}{\Delta I / \Delta t}$$

Вычислим значение индуктивности:

$$L = \frac{0,08}{50} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,6 \text{ мГн}$$

**Задача 10.** На стержень из немагнитного материала длиной  $\ell = 50$  см и сечением  $S = 3 \text{ см}^2$  намотан в один слой провод так, что на каждый сантиметр длины стержня приходится 20 витков. Определить энергию магнитного поля внутри соленоида, если сила тока в обмотке  $I = 0,5$  А.

**Решение.** Энергия магнитного поля соленоида с индуктивностью  $L$ , по обмотке которого течет ток  $I$ , выражается формулой

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

Индуктивность соленоида в случае немагнитного сердечника зависит только от числа витков на единицу длины и от объема сердечника  $V$  :

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

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Подставив в формулу энергии выражение индуктивности , получим:

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 V I^2$$

Выразим в этой формуле объем сердечника через его длину  $\ell$  и сечение  $S$ :

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 I^2 S \ell$$

Подставим числовые значения в формулу и произведем вычисления:

$$W = \frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot (2 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,5^2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} = 126 \text{ мкДж}$$

**Задача 11.** Угол падения луча света на боковую грань стеклянной призмы  $\varepsilon_1$  равен  $5^\circ$ . Преломляющий угол призмы  $\theta = 10^\circ$ . Определить угол отклонения луча призмой  $\varphi$ , если показатель преломления стекла  $n = 1,5$  и призма находится в воздухе.

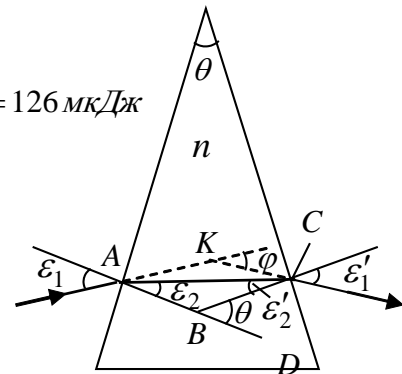


Рис. 2.7

**Решение.** Углом отклонения луча призмой  $\varphi$  является угол между продолжениями падающего на призму и выходящего из призмы лучей (рис. 2.7). Сначала определим угол преломления луча первой гранью призмы  $\varepsilon_2$ , для чего запишем закон преломления

$$\sin \varepsilon_1 = n \sin \varepsilon_2 \quad (2.1)$$

Так как углы  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  малы, то  $\sin \varepsilon_1 \approx \varepsilon_1$  и  $\sin \varepsilon_2 \approx \varepsilon_2$ , где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — величины углов падения и преломления, выраженные в радианах. Поэтому из (2.1) следует, что  $\varepsilon_1 = n \varepsilon_2$  или

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{n}. \quad (2.2)$$

Угол  $\angle CBD$  между перпендикулярами, проведенными к двум граням призмы, и преломляющий угол призмы  $\theta$  равны по критерию равенства углов с соответственно перпендикулярными сторонами ( $\angle CBD = \theta$ ). Отсюда, так как для  $\triangle ABC$  угол  $CBD$  является внешним, то

$$\theta = \varepsilon'_2 + \varepsilon_2, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon'_2$  — угол падения луча на вторую грань призмы. Выразим  $\varepsilon_2$  в (2.3) с помощью формулы (2.2). В результате получим, что

$$\varepsilon_2' = \theta - \frac{\varepsilon_1}{n}. \quad (2.4)$$

Угол преломления выходящего из призмы луча  $\varepsilon_1'$  свяжем с  $\varepsilon_2'$  с помощью закона преломления ( $\sin \varepsilon \approx \varepsilon$ ):

$$\varepsilon_1' = n\varepsilon_2' \quad (2.5)$$

Заменив  $\varepsilon_2'$  в (2.5) с помощью (2.4), получим выражение

$$\varepsilon_1' = n\theta - \varepsilon_1. \quad (2.6)$$

Так как  $\angle KAB = \varepsilon_1$  и  $\angle KCB = \varepsilon_1'$ , то (см. рис. 2.7)

$$\angle KAC = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad \text{и} \quad \angle KCA = \varepsilon_1' - \varepsilon_2'. \quad (2.7)$$

Угол отклонения луча призмой  $\varphi$  является внешним для  $\triangle KAC$  (рис. 2.7). Поэтому с учетом формул (2.7)

$$\varphi = \angle KAC + \angle KCA = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1' - \varepsilon_2'. \quad (2.8)$$

Выразив  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_1'$  и  $\varepsilon_2'$  в (2.8) через угол падения луча на призму  $\varepsilon_1$  соответственно с помощью формул (2.2), (2.6), (2.4), определим искомый угол отклонения луча призмой:

$$\varphi = (n - 1)\theta. \quad (2.9)$$

Проведем вычисления по формуле (2.9), переходя в ее правой и левой частях от радиан к градусам:

$$\varphi = (1.5 - 1)10^\circ = 5^\circ.$$

**Задача 12.** На стеклянный клин с малым преломляющим углом  $\alpha$  по нормали падает монохроматический естественный свет с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Расстояние  $\Delta y$  между соседними интерференционными максимумами при наблюдении в отраженном свете равно  $10^{-3}$  м. Определить преломляющий угол клина  $\alpha$ , если показатель преломления стекла  $n = 1.5$ .

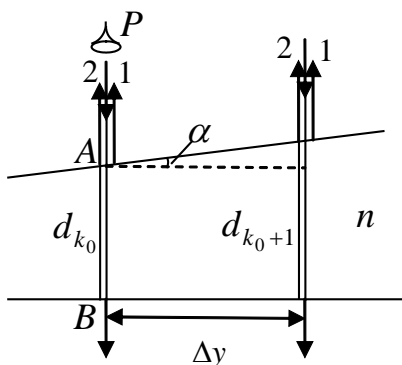


Рис. 2.8

**Решение.** Свет, падающий на клин, частично отражается его верхней поверхностью (волна 1), а частично его нижней поверхностью (волна 2). В силу малости преломляющего угла клина можно считать, что волны 1 и 2 распространяются в направлении обратном направлению падения света на клин (рис. 2.8). Если толщина клина достаточно мала, то эти волны (1 и 2) когерентны и, следовательно, будут интерферировать. Обозначим буквой  $O$  источник, а буквой  $P$  приемник светового излучения. Тогда оптические

пути первой ( $S_1$ ) и второй ( $S_2$ ) волны можно записать в виде

$$\begin{aligned} S_1 &= OA + \frac{\lambda}{2} + AP \\ S_2 &= OA + ABn + BAn + AP, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где в выражении для  $S_1$  слагаемое  $\frac{\lambda}{2}$  добавлено из-за отражения волны I от границы со средой оптически более плотной.

Обозначим буквой  $d$  толщину клина в рассматриваемом месте ( $AB = BA = d$ ). Тогда в соответствии с формулой (2.10) оптическая разность хода

$$\Delta = S_2 - S_1 = 2dn - \frac{\lambda}{2}. \quad (2.11)$$

Величину  $d$  в том месте, где наблюдается светлая полоса (интерференционный максимум), определим с помощью условия максимума интенсивности света при интерференции

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (2.12)$$

Приравняв правые части (2.11) и (2.12) и выразив  $d$ , получим, что

$$d = \frac{(2k+1)\lambda}{4n}. \quad (2.13)$$

Пусть на участке  $AB$ , где наблюдается светлая полоса, толщина клина  $d_{k_0}$  удовлетворяет формуле (2.13) при  $k = k_0$ . Тогда соседней светлой полосе соответствует толщина клина, определяемая по формуле (2.13) при  $k = k_0 + 1$ , и

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d_{k_0+1} - d_{k_0}}{\Delta y}, \quad (2.14)$$

где  $\alpha$  — преломляющий угол клина, а  $\Delta y$  — расстояние между соседними светлыми полосами (см. рис. 2.8). Выразим  $d_{k_0}$  и  $d_{k_0+1}$  в (2.14) с помощью (2.13):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\Delta y} \left[ \frac{(2k_0+3)\lambda}{4n} - \frac{(2k_0+1)\lambda}{4n} \right] = \frac{\lambda}{2n\Delta y}$$

Проведем вычисления:



$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{0.6 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

**Задача 13.** На диафрагму с круглым отверстием, диаметр которого  $D = 4 \text{ мм}$ , по нормали падает плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ ). Дифракционная картина наблюдается на расположенном за диафрагмой экране. При каком наибольшем расстоянии  $b_{\max}$  между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины еще будет располагаться минимум интенсивности?

**Решение.** В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля незакрытая препятствием часть волновой поверхности (в данном случае область отверстия в диафрагме) является источником когерентных вторичных волн. Интерференция этих вторичных волн приводит к возникновению на экране (рис. 2.9) дифракционной картины. Волновая поверхность разбивается на зоны Френеля так, чтобы излучение соседних зон в центре дифракционной картины гасило друг друга. Поэтому, если в области отверстия в диафрагме помещается четное число зон Френеля, то в центре дифракционной картины на экране возникает минимум интенсивности; если в области отверстия помещается нечетное число зон Френеля, то в центре дифракционной картины возникает максимум интенсивности. Внешний радиус  $k$ -ой зоны Френеля увеличивается при увеличении расстояния  $b$  между экраном и диафрагмой с отверстием:

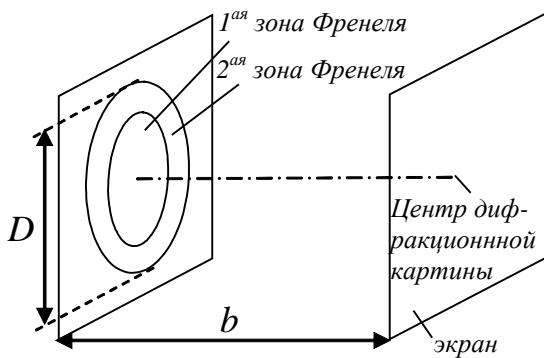


Рис. 2.9

$$r_k = \sqrt{bk\lambda}. \quad (2.15).$$

Поэтому, чем больше  $b$ , тем меньшее количество зон помещается в отверстии. Минимальное количество зон, при котором в центре дифракционной картины возникает минимум, равно 2 (минимальное четкое количество зон).

Поэтому  $b_{\max}$  определяется из условия  $\frac{D}{2} = r_2$ ,

где  $r_2$  — радиус второй зоны Френеля. Отсюда,

выразив  $r_2$  с помощью (2.15), получим, что

$$\frac{D}{2} = \sqrt{2b_{\max}\lambda} \quad \text{или} \quad b_{\max} = \frac{D^2}{8\lambda}.$$

Если  $b > b_{\max}$ , то количество зон Френеля в области отверстия не будет четным (будет

меньше двух, так как тогда  $r_2 > \frac{D}{2}$ ), то есть, в центре дифракционной картины не возникнет

минимум интенсивности. Проведем вычисления:

$$b_{\max} = \frac{16 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 4 \cdot 10^{-7}} = 5 \text{ м.}$$

**Задача 14.** Угол между плоскостями пропускания двух расположенных друг за другом поляроидов  $\varphi = 60^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении через такую систему, если коэффициент потерь света в каждом поляроиде  $K = 0,1$ .

**Решение.** Естественный свет, интенсивность которого  $I_{ест}$ , пройдя через первый поляроид, станет плоскополяризованным. Его интенсивность  $I_1$  можно связать с  $I_{ест}$  с помощью закона Малюса для естественного света:

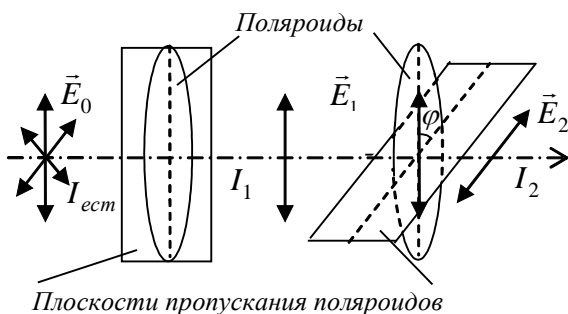


Рис. 2.10

$$I_1 = \frac{1}{2}(1 - K)I_{ест}. \quad (2.16)$$

Вектор напряженности электрического поля у световой волны между первым и вторым поляроидами  $\vec{E}_1$  колеблется в плоскости

пропускания первого поляроида. Поэтому угол между направлением колебаний  $\vec{E}_1$  и плоскостью пропускания второго поляроида равен  $\varphi$  (см. рис. 2.10). Это позволяет связать интенсивность света за вторым поляроидом  $I_2$  и интенсивность света за первым поляроидом  $I_1$  с помощью закона Малюса для плоскополяризованного света, записанного в следующем виде:

$$I_2 = I_1(1 - K) \cos^2 \varphi \quad (2.17)$$

Подставим выражение (2.16) для  $I_1$  в (2.17). В результате получим, что

$$I_2 = \frac{1}{2}(1 - K)^2 \cos^2 \varphi \cdot I_{ест},$$

то есть, что

$$\frac{I_{ест}}{I_2} = \frac{2}{(1 - K)^2 \cos^2 \varphi}.$$

Проведем вычисления:

$$\frac{I_{ест}}{I_2} = \frac{2}{0,9^2 \cdot 0,5^2} = 9,9$$

### Задачи контрольной работы №3.

вариант	номера задач							
0	300	310	320	330	340	350	360	370
1	301	311	321	331	341	351	361	371
2	302	312	322	332	342	352	362	372
3	303	313	323	333	343	353	363	373
4	304	314	324	334	344	354	364	374
5	305	315	325	335	345	355	365	375
6	306	316	326	336	346	356	366	376
7	307	317	327	337	347	357	367	377
8	308	318	328	338	348	358	368	378
9	309	319	329	339	349	359	369	379

300. Проволочный виток радиусом  $R = 50$  см расположен в плоскости магнитного меридиана. В центре витка установлена небольшая магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси. На какой угол отклонится стрелка, если по витку пустить ток силой  $I = 20$  А? Горизонтальную составляющую индукции земного магнитного поля принять равной  $B = 20$  мкТл.

301. Магнитная стрелка помещена в центре кругового витка расположенного в плоскости магнитного меридиана. Если по витку пропустить ток  $I_1 = 10$  А, то стрелка отклонится на угол  $\alpha = 60^\circ$  от плоскости магнитного меридиана. Какой ток пропустили по витку, если угол отклонения стрелки уменьшился в два раза?

302. По трем бесконечно длинным параллельным проводникам текут токи  $I_1 = I_2 = I$  и  $I_3 = 2I$ . Токи  $I_1$  и  $I_2$  текут в одном направлении, а ток  $I_3$  - в противоположном (рис.3.1).

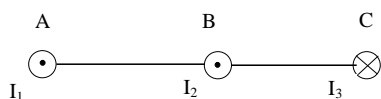


Рис.3.1

На рис.3.1 изображено сечение трех проводников с током плоскостью чертежа. Расстояние  $AB = 6$  см,  $BC = 8$  см. Найти точку на прямой  $AC$ , в которой индукция магнитного поля, вызванного токами  $I_1, I_2, I_3$  равна нулю.

303. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены перпендикулярно друг к другу и находятся во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.2). Найти индукцию магнитного поля в точках  $M_1$  и  $M_2$ , если  $I_1 = 5$  А,  $I_2 = 4$  А. Расстояния  $AM_1 = AM_2 = 2$  см,  $AB = 4$  см.

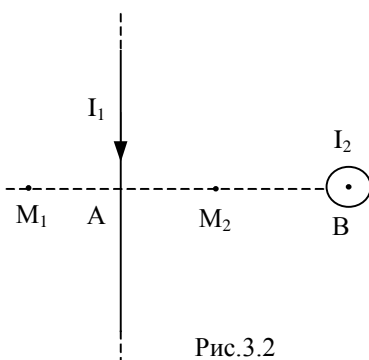


Рис.3.2

304. По длинному вертикальному проводу сверху вниз идет ток  $I = 10$  А. На каком расстоянии  $r$  от него индукция магнитного поля, получающаяся от сложения магнитного

поля Земли и поля тока, направлена вертикально вверх? Горизонтальная составляющая поля Земли  $B_{гор.} = 20 \text{ мкТл}$ .

305. Найти индукцию магнитного поля в центре кольца радиуса  $r = 25 \text{ см}$ . Подводящие провода, расположенные радиально, делят кольцо на две дуги (см. рис. 3.3). Угол  $\alpha = 90^\circ$ ,  $I = 5 \text{ А}$

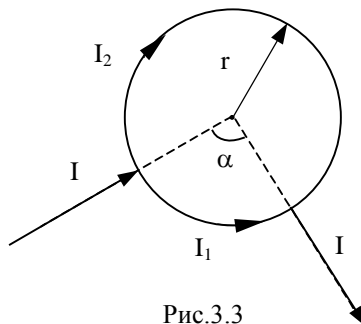


Рис.3.3

306. Найти индукцию магнитного поля  $B$  в центре плоского замкнутого контура, изображенного на рис. 3.4, по которому течет ток силы  $I = 2 \text{ А}$ . Контур состоит из двух дуг радиуса  $R = 10 \text{ см}$  и двух прямых углов.

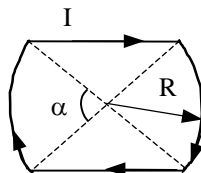


Рис.3.4

307. Бесконечно длинный прямой проводник согнут под прямым углом. По проводнику течет ток  $I = 8 \text{ А}$ . Какова магнитная индукция в точке  $A$  (рис. 3.5), если  $r = 10 \text{ см}$ ?

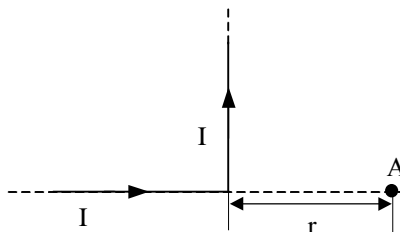


Рис.3.5

308. По бесконечно длинному прямому проводнику, изогнутому так как показано на рис. 3.6, течет ток  $I = 50 \text{ А}$ . Определить магнитную индукцию  $B$  в точке  $C$ , если  $r = 20 \text{ см}$ .

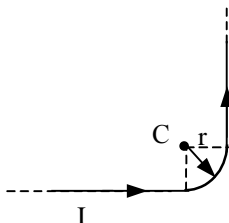


Рис.3.6

309. По тонкому проволочному кольцу течет ток. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Во сколько раз изменилась магнитная индукция в центре контура?

310. По трем параллельным, прямым проводам, находящимся на одинаковом расстоянии  $d = 20 \text{ см}$  друг от друга, текут одинаковые токи по  $80 \text{ А}$ . В двух проводах направления тока

совпадают. Вычислить силу, действующую на единицу длины каждого провода.

311. Квадратная проволочная рамка со стороной  $a = 5$  см расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу (Рис.3.7). По проводу течет ток  $I_1 = 10$  А, по рамке ток  $I_2 = 5$  А. Определить силу  $F$ , действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии  $b = 10$  см.

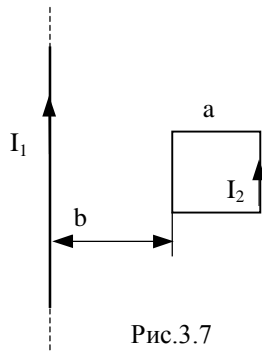
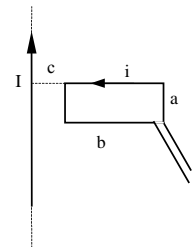


Рис.3.7

312. В однородном магнитном поле  $B = 20$  Тл перпендикулярно линиям индукции размещены две тонкие вертикальные проводящие шины, сопротивлением которых можно пренебречь, на расстоянии  $d = 50$  см друг от друга. По шинам может скользить, находясь все время в горизонтальном положении, медный стержень сечением  $S = 2$  см<sup>2</sup> и длиной  $\ell = 80$  см. Найти напряжение, которое нужно приложить к шинам, чтобы стержень покоился.

313. Проводник в виде тонкого полукольца радиусом  $R = 25$  см находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 50$  мТл. По проводнику течет ток  $I = 8$  А. Найти силу  $F$ , действующую на проводник, если плоскость полукольца перпендикулярна линиям индукции, а подводящие провода находятся вне поля.

314. Прямоугольная рамка со сторонами  $a = 8$  см и  $b = 18$  см, по которой течет ток  $i = 10$  А, расположена в одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током  $I = 40$  А так, что короткие стороны рамки параллельны проводу. Вычислить силу, действующую на сторону  $b$ , если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии  $c = 10$  см.



315. В однородном магнитном поле, индукция которого равна  $0,5$  Тл, движется равномерно проводник длиной  $15$  см. По проводнику течет ток  $3$  А. Скорость движения проводника равна  $20$  м/с и перпендикулярна к направлению магнитного поля. Найти работу перемещения проводника за  $20$  с движения.

316. По кольцу, сделанному из тонкого гибкого проводника радиусом  $R = 20$  см, течет ток  $I = 50$  А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено магнитное поле, индукция которого  $B = 2$  Тл. Собственное магнитное поле кольца и внешнее поле совпадают. Определить работу внешних сил, которые, действуя на проводник, деформировали его и придали ему форму квадрата. Сила тока при этом поддерживалась неизменной. Работой против упругих сил пренебречь.

317. В одной плоскости с бесконечно длинным прямым проводом, по которому идет ток силы  $I_1 = 4$  А, расположена прямоугольная рамка ( $20$  см  $\times$   $10$  см), по которой течет ток силы  $I_2 = 0,5$  А. Длинные стороны рамки параллельны прямому току, причем ближайшая находится от него на расстоянии  $X_0 = 6$  см, ток в ней сонаправлен току  $I_1$ . Определить работу, которую надо совершить, чтобы повернуть рамку на угол  $\alpha = \pi$  вокруг дальней длинной стороны.

318. Квадратный контур со стороной  $a = 20$  см, в котором течет ток силой  $I = 0,5$  А, находится в магнитном поле с индукцией  $B = 0,4$  Тл под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям индукции. Какую работу нужно совершить, чтобы при неизменной силе тока в контуре изменить его форму на окружность?

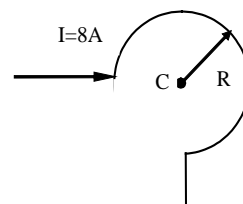
319. Виток, в котором поддерживается постоянная сила тока  $I = 2$  А, расположен в плоскости

- магнитного меридиана. Диаметр витка  $D = 50$  см. Какую работу надо совершить для того, чтобы повернуть виток относительно оси, совпадающей с диаметром на угол  $\alpha = 80^\circ$ ?
320. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $1000$  В, влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению его движения. Индукция магнитного поля равна  $2,38 \cdot 10^{-3}$  Тл. Найти: 1) радиус кривизны траектории электрона; 2) период обращения его по окружности; 3) импульс электрона.
321. Заряженная частица, обладающая скоростью  $V = 2 \cdot 10^5$  м/с, влетела в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,52$  Тл перпендикулярно к силовым линиям. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если частица в поле описала дугу окружности радиусом  $R = 4$  см. Определить по этому отношению, какая это частица.
322. Электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Скорость электрона  $V = 2 \cdot 10^{-7}$  м/с. Индукция магнитного поля равна  $4 \cdot 10^{-3}$  Тл. Чему равно тангенциальное и нормальное ускорение электрона в магнитном поле?
323. Заряженная частица движется по окружности радиусом  $R = 2$  см в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,4$  Тл. Параллельно магнитному полю возбуждено электрическое поле напряженностью  $E = 200$  В/м. Вычислить промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого должно действовать электрическое поле, для того, чтобы кинетическая энергия частицы возросла вдвое.
324. Перпендикулярно магнитному полю с индукцией  $B = 2,4$  Тл возбуждено электрическое поле напряженностью  $E = 96$  кВ/м. Перпендикулярно обоим полям движется, не отклоняясь от прямолинейной траектории, заряженная частица. Вычислить скорость частицы.
325. Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 6$  мТл по винтовой линии, радиус которой  $R = 1,2$  см и шаг  $h = 6$  см. Определить период обращения протона и его скорость.
326. Протон, имеющий скорость  $V = 10^4$  м/с, влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Вектор скорости протона направлен под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям индукции. Определить радиус и шаг винтовой линии.
327. Электрон влетает в плоский горизонтальный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью  $V_0 = 10$  м/с. Длина конденсатора  $\ell = 5$  см; напряженность электрического поля конденсатора  $E = 100$  В/см. При вылете из конденсатора электрон попадает в магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям электрического поля. Индукция магнитного поля  $B = 10^{-2}$  Тл. Найти радиус и шаг винтовой траектории электрона.
328. Винтовая линия, по которой движется электрон в однородном поле, имеет диаметр  $d = 80$  мм и шаг  $h = 200$  мм. Индукция поля  $B = 5$  мТл. Определить скорость электрона.
329. Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $300$  В, движется параллельно прямолинейному проводнику на расстоянии  $9$  мм от него. Какая сила будет действовать на электрон, если по проводнику пустить ток  $10$  А?
330. Сколько витков проволоки диаметром  $d = 0,6$  мм нужно намотать на картонный цилиндр диаметром  $D = 1$  см, чтобы получить однослойную катушку с индуктивностью  $L = 2$  мГн? Витки прилегают вплотную друг к другу.
331. Обмотка соленоида состоит из  $N$  витков медной проволоки, поперечное сечение которой  $S = 1$  мм<sup>2</sup>. Длина соленоида  $\ell = 25$  см и его сопротивление  $R = 0,2$  Ом. Найти индуктивность соленоида (без сердечника).
332. В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,6$  Тл в плоскости перпендикулярной силовым линиям поля, вращается стержень длиной  $\ell = 12$  см. Ось вращения проходит через один из концов стержня. Определить разность потенциалов на концах стержня при частоте его вращения  $n = 16$  об/с.
333. Рамка площадью  $S = 150$  см<sup>2</sup> равномерно вращается ( $n = 12$  об/с) относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям индукции однородного магнитного поля  $B = 0,6$  Тл. Каково среднее значение ЭДС индукции за время, в течение которого

магнитный поток, пронизывавший рамку, изменяется от нуля до максимального значения?

334. В магнитном поле, индукция которого равна  $0,5$  Тл, помещена катушка, состоящая из  $300$  витков проволоки. Сопротивление катушки  $60$  Ом, площадь ее поперечного сечения  $16$  см<sup>2</sup>. Катушка помещена так, что ее ось составляет угол  $60^\circ$  с направлением магнитного поля. Какое количество электричества протечет в катушке при выключении магнитного поля?

335. По проводнику, изогнутому в виде дуги длиной  $L = 40$  см, течет ток силой  $I = 8$  А. Определить объемную плотность энергии магнитного поля в точке С.



336. Магнитный поток  $\Phi$  в соленоиде, содержащем  $N = 2000$  витков, равен  $0,6$  мВб. Определить энергию магнитного поля соленоида, если сила тока, протекающего по виткам соленоида,  $I = 5$  А. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всем объеме соленоида считать однородным.

337. На каком расстоянии от бесконечно длинного проводника, по которому течет ток  $I = 10$  А, объемная плотность энергии магнитного поля равна  $w = 0,32$  мДж/м<sup>3</sup>?

338. Соленоид имеет длину  $\ell = 20$  см и сечение  $S = 30$  см<sup>2</sup>. Чему равна энергия магнитного поля  $W$  соленоида, если в нём создан магнитный поток  $\Phi = 180$  мкВб?

339. По проводнику в форме квадрата со стороной  $a = 10$  см протекает ток  $I = 0,6$  А. Определить объемную плотность энергии в точке пересечения диагоналей квадрата.

340. Луч света, распространяющегося в воздухе, падает на поверхность воды. Определить угол падения луча, если угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ . Показатель преломления воды равен  $1,33$ .

341. Пучок параллельных лучей падает на поверхность жидкости с показателем преломления  $1,5$ . Угол падения лучей равен  $60^\circ$ . Определить ширину пучка в жидкости, если ширина пучка в воздухе равна  $10$  см. (Шириной пучка параллельных лучей называется расстояние между крайними лучами, ограничивающими пучок).

342. Луч света падает под углом  $60^\circ$  на поверхность плоскопараллельной пластинки, показатель преломления которой  $1,5$ . Определить боковое смещение луча при выходе из пластинки (расстояние между продолжением падающего луча и выходящим из пластинки лучом), если ее толщина  $1$  см. Пластика находится в воздухе.

343. Преломляющий угол прозрачной призмы равен  $40^\circ$ . Угол отклонения призмой луча, падающего по нормали на ее боковую грань, равен  $35^\circ$ . Определить показатель преломления материала, из которого изготовлена призма, если призма находится в воздухе.

344. У призмы с показателем преломления  $1,5$  и преломляющим углом  $15^\circ$  одна грань посеребрена. Луч света падает по нормали на непосеребренную грань и после отражения от посеребренной грани выходит из призмы через ту же грань, через которую он вошел в нее. Определить угол между падающим и выходящим лучами, если призма находится в воздухе.

345. На расстоянии  $15$  см от собирающей линзы, оптическая сила которой равна  $10$  диоптриям, на оптической оси перпендикулярно к ней расположен предмет высотой  $2$  см. Найти положение и высоту изображения. Сделать чертеж.

346. Собирающая линза дает на экране увеличенное в два раза изображение предмета. Расстояние между линзой и экраном равно  $60$  см. Определить оптическую силу линзы.

347. Определить фокусное расстояние линзы, погруженной в воду, если ее фокусное расстояние в воздухе равно  $40$  см. Что произойдет, если воду заменить сероуглеродом с показателем преломления равным  $1,63$ ? Показатель преломления стекла —  $1,5$ , воды —  $1,33$ .

348. На рассеивающую линзу падает сходящийся пучок лучей. После прохождения через линзу лучи пересекаются в точке, лежащей на расстоянии  $15$  см от линзы. Если линзу убрать, то точка пересечения лучей сместится на  $5$  см в сторону места, где раньше находилась линза. Определить оптическую силу линзы.

349. Определить показатель преломления стекла, из которого изготовлена двояковыпуклая линза с радиусами кривизны поверхностей  $20$  см, если действительное изображение

- предмета, расположенного на расстоянии 25 см от линзы, получилось на расстоянии 1 м от нее.
350. На мыльную пленку, толщина которой 0,35 мкм и показатель преломления 1,33, по нормали к ее поверхности падает белый свет. Определить, какая спектральная составляющая белого света ( $0,4 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,76 \text{ мкм}$ ) будет ослаблена в результате интерференции, если наблюдение ведется в отраженном свете.
351. На стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ) нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления  $n' = 1,3$ . На пластинку (со стороны покрытия) по нормали падает пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 600 \text{ нм}$ . При какой минимальной толщине покрытия отраженный свет будет максимально ослаблен вследствие интерференции?
352. Какого цвета будет мыльная пленка в отраженном свете, если на нее по нормали падает белый свет? Толщина пленки 0,1 мкм, показатель преломления 1,33.
353. Какого цвета будет мыльная планка в проходящем свете, если на нее по нормали падает белый свет? Толщина пленки 0,2 мкм, показатель преломления 1,33.
354. На тонкий стеклянный клин падает по нормали свет с длиной волны 0,5 мкм. Расстояние между соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 0,4 мм. Показатель преломления стекла равен 1,5. Определить угол между поверхностями клина.
355. На тонкий прозрачный клин падает по нормали белый свет. Расстояние между соседними красными полосами ( $\lambda = 0,76 \text{ мкм}$ ) равно 3 мм. Определить расстояние между соседними фиолетовыми полосами ( $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ ). Наблюдение ведется в отраженном свете.
356. Стеклянный клин с углом между гранями  $2 \cdot 10^{-4}$  рад освещается по нормали к его поверхности монохроматическим светом с длиной волны 0,6 мкм. Сколько темных интерференционных полос приходится на 1 см длины клина? Показатель преломления стекла 1,5. Наблюдение ведется в отраженном свете.
357. Плосковыпуклая стеклянная линза лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке и освещается по нормали монохроматическим светом с длиной волны 0,6 мкм. В зазоре между линзой и пластинкой находится воздух ( $n_a = 1$ ). Найти фокусное расстояние линзы, если радиус седьмого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 2,2 мм. Показатель преломления стекла 1,5.
358. Расстояние между пятым и двадцать пятым светлыми кольцами Ньютона равно 9 мм. Радиус выпуклой поверхности плосковыпуклой линзы равен 15 м. Определить длину волны монохроматического света, падающего по нормали на установку, если наблюдение ведется в отраженном свете, а в зазоре между линзой и плоскопараллельной стеклянной пластинкой находится воздух ( $n_a = 1$ ).
359. Два точечных когерентных источника, расстояние между которыми равно 0,35 мм, излучают свет с длиной волны 0,5 мкм и одинаковой начальной фазой. Определить ширину светлых полос на экране, если расстояние от источников до экрана равно 1,5 м.
360. На диафрагму с круглым отверстием по нормали падает плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ ). Дифракционная картина наблюдается на экране, расстояние которого до диафрагмы с отверстием может меняться от 1,43 м до 2 м. Определить при скольких положениях экрана в центре дифракционной картины будет располагаться минимум интенсивности. Диаметр отверстия равен 4 мм.
361. На диафрагму с круглым отверстием по нормали падает плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ ). Дифракционная картина наблюдается на экране, расстояние которого до диафрагмы с отверстием может меняться от 2,5 м до 5 м. Определить, при скольких положениях экрана в центре дифракционной картины будет наблюдаться максимум интенсивности. Диаметр отверстия равен 4 мм.
362. На круглое отверстие диаметром 4 мм по нормали падает плоская монохроматическая



волна ( $\lambda = 0,5$  мкм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии 1 м от него. Определить максимум или минимум интенсивности возникает в точке наблюдения.

363. На узкую щель шириной  $2 \cdot 10^{-4}$  см падает по нормали плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,66$  мкм). На экране, расположенном достаточно далеко от щели, возникает дифракционная картина. Определить угловую ширину центрального максимума.

364. На узкую щель шириной  $2 \cdot 10^{-4}$  см падает по нормали плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,66$  мкм). Определите ширину центрального дифракционного максимума на экране, если расстояние от щели до экрана равно 1 м.

365. На дифракционную решетку, период которой 0,8 мкм, падает по нормали плоская монохроматическая волна ( $\lambda = 0,4$  мкм). На экране, расположенном достаточно далеко от решетки, возникает дифракционная картина. Определить количество главных максимумов. Сколько штрихов на 1 мм имеет такая решетка?

366. На дифракционную решетку падает по нормали плоская монохроматическая волна. Определить угол, под которым на экране наблюдается дифракционный максимум 2-го порядка, если максимум 1-го порядка наблюдается под углом  $10^\circ$ . Экран расположен достаточно далеко от решетки.

367. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая линия ( $\lambda = 0,4$  мкм) спектра третьего порядка, если на дифракционную решетку падает по нормали белый свет? Экран, на котором возникает дифракционная картина, расположен достаточно далеко от решетки.

368. На дифракционную решетку, период которой 2 мкм, падает по нормали белый свет. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от решетки до экрана 2 м. Границы видимого диапазона:  $\lambda_{\phi} = 0,4$  мкм,  $\lambda_{кр} = 0,76$  мкм.

369. Дифракционная решетка шириной 2,5 см имеет период равный 2 мкм. Какую разность длин волн может разрешить эта решетка в желтой области спектра ( $\lambda = 0,6$  мкм) в спектре второго порядка?

370. Анализатор в два раза уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора. Определить угол между плоскостями пропускания анализатора и поляризатора, если потерями света в анализаторе можно пренебречь.

371. Определить показатель преломления стекла, если при падении на него света из воздуха отраженный луч полностью поляризован тогда, когда преломленный луч отклоняется от нормали на  $30^\circ$ .

372. Угол между плоскостями пропускания двух одинаковых поляризаторов равен  $60^\circ$ . Естественный свет, проходя через такую систему, ослабляется в 10 раз. Определить коэффициент потерь света  $K$  в одном поляризаторе.

373. На какой угловой высоте над горизонтом должно находиться Солнце, чтобы солнечный свет, отраженный от поверхности воды, был полностью поляризован? Показатель преломления воды 1,33.

374. Угол падения луча света из воздуха на поверхность жидкости равен  $55^\circ$ . Определить угол преломления луча, если отраженный свет полностью поляризован.

375. Чему равен угол между плоскостями пропускания двух, расположенных друг за другом поляризаторов, если интенсивность естественного света, прошедшего через эту систему, уменьшилась в 4 раза? Потерями света в поляризаторах пренебречь.

376. Естественный свет падает на систему, состоящую из 3-х расположенных друг за другом поляризаторов. Угол между плоскостями пропускания первого и второго поляризатора равен  $30^\circ$ , второго и третьего —  $60^\circ$ . Во сколько раз уменьшается интенсивность естественного света после прохождения этой системы? Потерями света в поляризаторах пренебречь.

377. При прохождении света через трубку длиной 20 см, содержащую раствор сахара с концентрацией  $0,1$  г/см<sup>3</sup>, плоскость поляризации света повернулась на  $13,3^\circ$ . В другом растворе сахара, налитом в трубку длиной 15 см, плоскость поляризации повернулась на

5,2°, Определить концентрацию второго раствора.

378. Пластинка кварца толщиной 2 мм поворачивает плоскость поляризации монохроматического света на  $53^\circ$ . Пластинку, изготовленную из того же материала, но имеющую другую толщину, помещают между поляроидами, плоскости пропускания которых параллельны. При какой наименьшей толщине пластинки свет не будет проходить через систему?

379. Пластинка кварца толщиной 1 мм поворачивает плоскость поляризации монохроматического света на  $26,5^\circ$ . Пластинку, изготовленную из того же материала, но имеющую другую толщину, помещают между поляроидами, плоскости пропускания которых взаимно перпендикулярны. При какой наименьшей толщине пластинки система будет максимально пропускать свет?

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №4

содержит задачи по следующим основным разделам физики:

- тепловое излучение,
- явление внешнего фотоэффекта,
- эффект Комптона,
- теория Бора атома водорода,
- волны де Бройля и соотношение неопределенностей,
- радиоактивный распад,
- дефект массы и энергия связи ядра,
- ядерные реакции.

### Основные законы и формулы.

#### 1. Тепловое излучение.

Тепловое излучение – это излучение веществом электромагнитных волн, обусловленное возбуждением атомов и молекул тела, вследствие их теплового движения. Оно свойственно всем телам при температуре выше абсолютного нуля. Интенсивность теплового излучения характеризуют величиной энергетической светимости  $R_T$ . Она равна энергии электромагнитного излучения, испускаемого в единицу времени с единицы площади поверхности тела в области частот от нуля до бесконечности.

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

где  $E$  – энергия, излучаемая поверхностью,  $S$  – площадь поверхности,  $t$  – время излучения,  $\Phi$  – поток излучения.

Закон Стефана-Больцмана:

$$R_e = \sigma \cdot T^4,$$

где  $R_e$  – энергетическая светимость черного тела,

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

$T$  - термодинамическая температура по шкале Кельвина.

Энергетическая светимость серого тела:

$$R_T = a_T \sigma \cdot T^4,$$

где  $a_T$  – поглотительная способность серого тела.

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} T = b,$$

где  $\lambda_{\max}$  - длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости;  $b = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

Максимальная спектральная плотность энергетической светимости:

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

$$\text{где } C = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)}$$

#### 2. Явление внешнего фотоэффекта.

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\varepsilon_0 = A_{\text{вых}} + W_{\text{max}},$$

$\varepsilon_0$  – энергия фотона,  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из металла,  $W_{\text{max}}$  – максимальная кинетическая энергия фотона.

Энергия фотона:

$$\varepsilon_0 = h\nu,$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота.

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Задерживающее напряжение  $U_0$ :

$$eU_0 = \frac{mV_{\text{max}}^2}{2},$$

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

Импульс фотона:

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

### 3. Эффект Комптона.

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и  $\gamma$  - излучений) на свободных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.

Формула Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = 2\frac{h}{m_0c}\sin^2\frac{\theta}{2},$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего излучения,  $\lambda'$  - длина волны рассеянного излучения,  $\theta$  - угол рассеяния,  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона.

$\lambda_K = \frac{h}{m_0c} = 2,3 \cdot 10^{-12}$  м – комптоновская длина волны электрона.

Максимальное изменение длины волны  $\Delta\lambda$  наблюдается при  $\theta = 180^\circ$ .

### 4. Теория Бора атома водорода.

Энергия, излучаемая (поглощаемая) атомом:

$$E_{n,m} = h\nu_{n,m} = E_n - E_m,$$

где  $n, m$  – квантовые числа энергетических уровней электрона в атоме, между которыми происходит переход электрона;  $E_n$  и  $E_m$  – энергии стационарных состояний атома.

Длина волны излучения:

$$\lambda_{n,m} = \frac{c}{\nu_{n,m}} = \frac{hc}{(E_n - E_m)}$$

Энергия электрона, находящегося на уровне с квантовым числом  $n$ :

$$E_n = -\frac{E_{n,i}}{n^2},$$

где  $E_{n,i} = 13,55$  эВ – энергия ионизации атома водорода.

Радиус стационарной орбиты электрона с квантовым числом энергетического уровня  $n$ :

$$r_n = a_0 n^2,$$

где  $a_0 = 52,9 \cdot 10^{-12}$  м – радиус первой (невозбужденной) орбиты электрона.

Формула Бальмера позволяет описать серии в спектре атома водорода:

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

$m$  – имеет в каждой серии постоянное значение,  $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  определяет серию;  
 $n$  – принимает целочисленные значения, начиная с  $(m+1)$ , определяет отдельные линии этой серии,  $R = 1,09737 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

### 5. Волны де Бройля и соотношение неопределенностей.

Длина волны де Бройля для частицы, обладающей импульсом  $p$ :

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

В классической механике ( $V \ll c$ )

$$\vec{p} = m\vec{V}$$

$m$  – масса частицы,  $V$  – скорость.

Если скорость частицы соизмерима со скоростью света в вакууме (релятивистские условия), импульс определяют по формуле:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{V}}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}$$

Связь импульса с кинетической энергией  $E_k$  для классической механики:

$$p = \sqrt{2mE_k},$$

для релятивистских условий:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2E_0)},$$

$E_0$  – энергия покоя частицы.

Соотношение неопределенностей

для координат и импульса:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}, \quad \Delta p_y \cdot \Delta y \geq \frac{h}{2\pi}, \quad \Delta p_z \cdot \Delta z \geq \frac{h}{2\pi},$$

где  $\Delta p_i$  – неопределенность проекции импульса на оси  $i$  ( $i=x, y, z$ ),

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – неопределенности координат;

для энергии и времени:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi},$$

$\Delta E$  – неопределенность энергии некоторого состояния системы,

$\Delta t$  – промежуток времени, в течение которого оно существует.

### 6. Радиоактивный распад.

Радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение неустойчивых ядер одного элемента в ядра другого.

Закон радиоактивного распада:

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

где  $N(t)$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ,

$N_0$  - число нераспавшихся ядер в момент времени  $t = 0$ ,

$\lambda$  – постоянная распада, характеризующая вероятность распада в единицу времени.

Число ядер, распавшихся за время  $\Delta t$ :

$$\Delta N = N(t) - N(t - \Delta t) = N(t) \cdot (1 - e^{-\lambda t}).$$

Период полураспада  $T$  – это промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в два раза:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Число ядер, содержащихся в массе  $m$  радиоактивного вещества:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где  $\mu$  – молярная масса вещества,  $N_A$  – число Авогадро

( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>).

Активность радиоактивного препарата – это число ядер, распавшихся в единицу времени:

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t),$$
$$a = a_0 e^{-\lambda t},$$

где  $a_0 = \lambda N_0$  – активность в начальный момент времени.

Единица активности в системе СИ – беккерель (Бк); 1Бк – активность изотопа, при которой за 1с проходит один акт распада. Внесистемная единица – кюри (Ки):

1Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

Удельной активностью называется число распадов в 1с на единицу массы распадающегося вещества.

## 7. Дефект массы и энергия связи ядра.

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Протон ( $p$ ) имеет положительный заряд, равный заряду электрона, нейтрон ( $n$ ) – нейтральная частица. Протоны и нейтроны называются нуклонами, общее число нуклонов в атомном ядре называется массовым числом  $A$ .

Ядро обозначается символом  ${}^A_Z X$ ,

где  $X$  – символ химического элемента,  $Z$  – атомный номер (число протонов в ядре),

$A$  – массовое число (число нуклонов в ядре),  $A = Z + N$ ,  $N$  – число нейтронов в ядре. Массы ядер и атомов измеряются в атомных единицах массы (а.е.м). За атомную единицу массы

принимается  $\frac{1}{12}$  массы изотопа углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  :

$$1 \text{ а.е.м} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = \frac{1}{c^2} \cdot 931,5 \text{ (МэВ)}.$$

Дефект массы ядра  $\Delta m$  – разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра  $m_j$  :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_j,$$

где  $m_p$  – масса протона,  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_j$  – масса ядра.

В справочных таблицах приводятся не массы ядер, а массы  $M_a$  атомов. Для расчетов дефекта массы используется формула:

$$\Delta m = ZM_{\text{H}} + Nm_n - M,$$

здесь  $M_{\text{H}} = m_p + m_e$  – масса изотопа водорода  ${}^1_1\text{H}$ .

Энергия связи нуклонов в ядре:

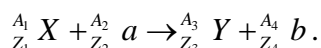
$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2,$$
$$E_{св} = 931,5 \cdot \Delta m \text{ (МэВ)}.$$

Отношение энергии связи ядра  $E_{св}$  к числу нуклонов в ядре называется удельной энергией связи нуклонов в ядре.

$$E_{св.уд} = \frac{E_{св}}{A}.$$

## 8. Ядерные реакции.

Ядерные реакции – это превращение атомных ядер, вызванные взаимодействиями их друг с другом или с элементарными частицами:

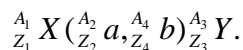


При ядерных реакциях выполняются законы сохранения массового и зарядового чисел:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4,$$
$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4,$$

где индексы 1 и 2 относятся к исходным реагентам, а 3 и 4 – к продуктам реакции.

Сокращенный способ записи ядерных реакций: записывается бомбардируемое ядро (мишень), затем в скобках указывается на первом месте налетающая частица (снаряд), а за ней – все частицы, вылетевшие в результате реакции; после скобок обозначается получившееся ядро (продукт).



Энергетический эффект ядерной реакции:

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где  $m_i$  – масса реагентов.

Если  $(m_1 + m_2) > (m_3 + m_4)$ , то энергия выделяется, энергетический эффект положителен ( $Q > 0$ ) – экзотермическая реакция, если ( $Q < 0$ ) – реакция эндотермическая.

При расчете энергии (или мощности), выделяющейся при работе ядерного реактора надо учитывать, что при делении одного ядра урана – 235 освобождается энергия 200 МэВ.

## Примеры решения задач.

**Задача. 1.** Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютного черного тела  $\lambda_{\max} = 0,58 \text{ мкм}$ . Определить:

1) энергетическую светимость  $R_e$  поверхности тела; 2) максимальную спектральную плотность  $(r_{\lambda,T})_{\max}$  энергетической светимости, рассчитанную на интервал длин волн  $\Delta \lambda = 1 \text{ нм}$  вблизи  $\lambda_{\max}$ .

**Решение.** Энергетическая светимость абсолютно черного тела  $R_a$ , в соответствии с законом Стефана-Больцмана, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры и выражается формулой:

$$R_e = \sigma \cdot T^4. \quad (\text{I.I})$$

Температуру, входящую в формулу (I.I), можно вычислить с помощью закона смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}. \quad (\text{1.2})$$

Выражая из формулы (1.2)  $T$  и подставляя ее в формулу (I.I), получим

$$R_e = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_{\max}} \right)^4. \quad (1.3)$$

Проверим единицы измерения искомой величины:

$$[R_e] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \left( \frac{\text{мК}}{\text{м}} \right)^4 = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Подставим числовые значения в формулу (1.3) и произведем вычисления

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Максимум спектральной плотности энергетической светимости пропорционален пятой степени абсолютной температуры и выражается формулой:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = CT^5. \quad (1.4)$$

В эту формулу подставим температуру из выражения (1.2), тогда

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = C \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^5, \quad (1.5)$$

$$C = 1,30 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5}.$$

По условию задачи требуется вычислить спектральную плотность энергетической светимости на интервал длин волн  $\Delta \lambda$  нм; пересчитаем величину  $C$  на данный интервал длин волн:

$$C = 1,30 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{К}^5}.$$

Проверим единицы измерения искомой величины:

$$[(r_{\lambda,T})_{\max}] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{К}^5} \left( \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{м}} \right)^5 = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{нм}}.$$

Произведя вычисления, получим:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = 1,30 \cdot 10^{-14} \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^5 = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{нм}},$$

или

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = 40,6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{нм}}.$$

**Задача 2.** Определить максимальную скорость  $V_{\max}$  фотоэлектронов, вырываемых с поверхности металла под действием излучения с длиной волны  $\lambda = 0,1$  мкм. Работа выхода электрона из данного металла 4 эВ.

**Решение**

Для расчета максимальной скорости фотоэлектронов воспользуемся уравнением Эйнштейна:

$$\varepsilon_0 = A_{\text{вых}} + W_{\max} \quad (1.6)$$

Кинетическая энергия, которую приобретает фотоэлектрон, равна разности энергии фотона, падающего на металл, и работы выхода электрона из металла. Для расчета кинетической энергии электрона можно воспользоваться формулой классической механики

$$E_K = \frac{mV_{\max}^2}{2}. \quad (1.7)$$

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = \varepsilon_0 - A_{\text{вых}},$$

откуда



$$V_{\max} = \sqrt{2(\varepsilon_0 - A_{\max})/m}. \quad (1.8)$$

Проверим единицы измерения искомой величины

$$[V] = [(\frac{\varepsilon_0 - A_{\max}}{m})^{1/2}] = (\frac{\text{Дж}}{\text{кг}})^{1/2} = (\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{\text{кг}})^{1/2} = \text{м/с}$$

Подставим значения величин в формулу (1.8):

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2(1,99 \cdot 10^{-18} - 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})}{9,11 \cdot 10^{-31}}} \text{ м/с} = 1,72 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Задача 3. Фотон с энергией 0,8 МэВ испытывает комптоновское рассеяние на электроне под углом  $120^\circ$ . Определить энергию фотона после рассеяния и изменение энергии электрона.

Решение.

Для решения задачи используем закон сохранения энергии. Энергия падающего фотона  $\varepsilon$  равна сумме энергии рассеянного фотона  $\varepsilon'$  и  $\Delta E$  - изменения энергии электрона, испытавшего столкновение с фотоном

$$\varepsilon = \varepsilon' + \Delta E$$

Электрон, который в эффекте Комптона приобретает импульс и энергию, называют электроном отдачи.

Энергия рассеянного фотона равна:

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

где  $\lambda'$  -длина волны рассеянного фотона:

$$\lambda' = \lambda + 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1.9)$$

Выразим длину волны падающего фотона через энергию фотона:

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

После подстановки значений  $\lambda$  и  $\lambda'$  в (1.9) получим выражение для энергии рассеянного фотона:

$$\frac{hc}{\varepsilon'} = \frac{hc}{\varepsilon} + 2 \frac{h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

откуда

$$\varepsilon' = \frac{hc}{hc/\varepsilon + 2h/m_0 c \cdot \sin^2 \theta/2}$$

или после сокращения на  $h$ :

$$\varepsilon' = \frac{c}{c/\varepsilon + 2/m_0 c \cdot \sin^2 \theta/2} \quad (1.10)$$

Проверим единицы измерения искомой величины:

$$[\varepsilon'] = \frac{\text{м/с}}{\text{м/с} \cdot \text{Дж} + 1/\text{кг} \cdot \text{м/с}} = \text{Дж}.$$

Выполним вычисления в системе СИ:

$$\varepsilon' = 0,8 \text{ МэВ} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,28 \cdot 10^{-13} \text{ Дж},$$

$$\varepsilon' \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^8 / 1,28 \cdot 10^{-13} + 2 / (9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8)} \cdot (0,866)^2 \text{ Дж} = 3,84 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Изменение энергии электрона равно:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon',$$

или после подстановки:

$$\Delta\varepsilon = (1,28 \cdot 10^{-13} - 3,84 \cdot 10^{-14}) \text{ Дж} = 8,96 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

**Задача 4.** Найти наименьшую и наибольшую длины волн ультрафиолетовой серии водорода (серия Лаймана).

**Решение** Для серии Лаймана квантовое число общего нижнего электронного уровня  $n = 1$ . Поэтому формула для  $\lambda_{n,m}$  приобретает вид:

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

Видно, что  $\lambda_{\max}$  получится, если квантовое число верхнего уровня будет минимальным; квантовое число  $n$  должно быть больше  $m$ , поэтому  $n_{\min} = 2$  (переход электрона с первого возбужденного уровня).

Итак,

$$\frac{1}{\lambda_{\max}} = R \left( 1 - \frac{1}{4} \right) = \frac{3R}{4},$$

откуда

$$\lambda_{\max} = \frac{4}{3R} = \frac{1,333}{1,0974 \cdot 10^7} = 1,21491 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 121,4 \text{ нм}.$$

Минимальная длина волны серии Лаймана соответствует переходу с уровня, обладающего наибольшим значением  $n$ . В пределе  $n \rightarrow \infty$ .

Таким образом:

$$\frac{1}{\lambda_{\min}} = R(1 - 0) = R,$$

т.е.  $\lambda_{\min} = \frac{1}{1,0974 \cdot 10^7} = 0,911 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 91,1 \text{ нм}$

итак,

$$\lambda_{\max} = 121,4 \text{ нм},$$

$$\lambda_{\min} = 91,1 \text{ нм}.$$

**Задача 5.** Найти скорость электрона, обладающего кинетической энергией 1 МэВ. Найти длину волны де Бройля такого электрона.

**Решение.** Сравним кинетическую энергию электрона с его энергией покоя  $E_0$ , чтобы определить, в каких условиях находится частица - классических или релятивистских:

$$E_0 = m_0 c^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} (3 \cdot 10^8)^2 = 0,82 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 0,511 \text{ МэВ}$$

Так как  $\frac{E_K}{E_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-13}}{0,82 \cdot 10^{-13}} > 1$ , то условия релятивистские.

Для определения длины волны де Бройля применим формулу:

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{(2E_0 + E_K)E_K}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\sqrt{1,6 \cdot 10^{-13} \cdot (1,64 \cdot 10^{-13} + 1,6 \cdot 10^{-13})}} = 8,75 \cdot 10^{-13} \text{ м} = 87,5 \text{ пм};$$

(1 пм =  $10^{-12}$  м)

Найдем скорость движения электрона. Для релятивистских условий учитываем изменение массы в зависимости от скорости. Определим сначала величину  $\beta = \frac{V}{c}$  по формуле:

$$\beta = \frac{\sqrt{(2E_0 + E_K)E_K}}{E_0 + E_K}.$$

Для вычисления  $\beta$  удобно все энергии подставить в мегаэлектронвольтах:

$$\beta = \frac{\sqrt{(2 \cdot 0,511 + 1)}}{0,511 + 1} = 0,941.$$

Следовательно, скорость электрона:

$$V = \beta \cdot c = 0,941 \cdot 3 \cdot 10^8 = 2,82 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Заметим, что использование формул классической механики привело бы к неправильному результату для скорости. Кинетическая энергия в классических условиях:

$$E_K = \frac{m_0 V_{кл}^2}{2},$$

откуда

$$V_{кл} = \sqrt{\frac{2E_K}{m_0}} = 5,95 \cdot 10^8 \text{ м/с} > c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Видно, что  $V_{кл} > c$ , что вообще невозможно.

**Задача 6.** Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет  $E_K = 20$  эВ.

Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

**Решение.** Ввиду того, что  $E_K \ll E_0$  (последняя для электрона составляет 0,511 МэВ), импульс электрона можно определить по формуле:

$$p = \sqrt{2m_0 E_K} = \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 20 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 24,13 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Неопределенность координаты электрона в атоме  $\Delta x$  можно принять равной радиусу атома

$\Delta x = \frac{d_{\min}}{2}$ ; используя соотношение неопределенностей в форме  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ , получим:

$$\Delta x_{\min} = \frac{\hbar}{\Delta p_x}.$$

Считаем, что для оценки размера атома можно применять:

$\Delta p_x = p$  (неопределенность импульса не может быть больше самого импульса). Поэтому:

$$\Delta x_{\min} = \frac{d_{\min}}{2} = \frac{\hbar}{p} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{24,13 \cdot 10^{-25}} = 4,35 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

Следовательно,  $d_{\min} = 8,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ .

Задача 7. При измерении периода полураспада счетчик в течение 1 мин насчитал 250 импульсов, а спустя 1 час после начала первого измерения – 92 импульса в минуту. Найти  $\lambda$  и  $T$ .

Решение. Число импульсов  $\Delta n$ , регистрируемых счетчиком за время  $\Delta t$ , пропорционально числу распадов  $\Delta N$ . При первом измерении:

$$\Delta n_1 = k \cdot \Delta N_1 = kN_1(1 - e^{-\lambda \Delta t_1}),$$

где  $N_1$  – количество радиоактивных ядер к моменту начала первого счета,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

При втором измерении:

$$\Delta n_2 = k \cdot \Delta N_2 = kN_2(1 - e^{-\lambda \Delta t_2}),$$

где  $N_2$  – количество нераспавшихся ядер к началу второго измерения,  $\Delta t_2 = \Delta t_1 = 1 \text{ мин}$  – времена измерений.

Разделим одно уравнение на другое, учитывая, что  $N_2 = N_1 \cdot e^{-\lambda t_3}$ , где  $t_3$  – время, прошедшее от первого до второго измерения (по условию  $t_3 = 60 \text{ мин}$ ), получим:

$$\frac{\Delta n_1}{\Delta n_2} = e^{\lambda t_3}.$$

После логарифмирования получим:

$$\ln \frac{\Delta n_1}{\Delta n_2} = \lambda t_3.$$

Итак,

$$\lambda = \frac{1}{t_3} \ln \frac{\Delta n_1}{\Delta n_2} = \frac{1}{60} \ln \frac{250}{92} \text{ мин}^{-1} = 0,0166 \text{ мин}^{-1}.$$

Период полураспада:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{0,0166} = 41,5 \text{ мин}.$$

Задача 8. Найти энергию, которая необходима для отрыва одного нейтрона от ядра  ${}_{11}^{23}\text{Na}$ .

Решение. Ядро  ${}_{11}^{23}\text{Na}$  можно рассматривать как систему, образовавшуюся при добавлении одного нейтрона к ядру  ${}_{11}^{22}\text{Na}$ . Поэтому для решения задачи надо найти энергию связи нейтрона с ядром  ${}_{11}^{22}\text{Na}$ . Дефект массы при добавлении нейтрона к ядру  ${}_{11}^{22}\text{Na}$  определяется по формуле:

$$\Delta M = (m_{\text{я}}^{22\text{Na}} + m_{\text{н}}) - m_{\text{я}}^{23\text{Na}}$$

Чтобы перейти к табличным значениям масс изотопа, заменим массы ядер массами атомов.

Так как у атомов изотопа  ${}_{11}^{22}\text{Na}$  и  ${}_{11}^{23}\text{Na}$  одинаковое количество электронов, то при такой замене дефект массы не изменится.

Тогда:

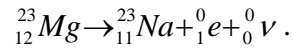
$$\Delta M = (M_{\text{а}}^{22\text{Na}} + m_{\text{н}}) - M_{\text{а}}^{23\text{Na}}$$

Энергия связи нейтрона в ядре  ${}_{11}^{22}\text{Na}$  :

$$E_{\text{св}} = 931,4[(M a^{22\text{Na}} + m_n) - M a^{23\text{Na}}] = 931,4[(21,99444 + 1,00867) - 22,98977] = 12,421 \text{ МэВ}.$$

Задача 9. Радиоактивное ядро магния  ${}^{23}\text{Mg}$  выбросило позитрон и нейтрино. Найти энергию  $\beta^+$ -распада ядра.

Решение. Реакцию  $\beta^+$ -распада можно записать так:



Считая, что ядро  $\text{Mg}$  было неподвижным, и принимая, что масса нейтрино равна нулю, составим уравнение баланса энергии (символом  $m_{e^+}$  обозначена масса позитрона):

$$m^{\text{Mg}} \cdot c^2 = m^{\text{Na}} \cdot c^2 + E_K^{\text{Na}} + m_{e^+} \cdot c^2 + E_K^{e^+} + E_K^{\nu}$$

Энергия, выделяющаяся при радиоактивном распаде ядра магния:

$$Q = E_K^{\text{Na}} + E_K^{e^+} + E_K^{\nu}.$$

Сопоставляя последние выражения, видим, что:

$$Q = (m^{\text{Mg}} - m^{\text{Na}} - m^{e^+})c^2.$$

Перейдем от масс ядер к массам атомов:

$$Q = [(M^{\text{Mg}} - 12m_e) - (M^{\text{Na}} - 11m_e) - m^{e^+}]c^2$$

Так как массы электрона и позитрона одинаковы, то:

$$Q = c^2(M^{\text{Mg}} - M^{\text{Na}} - 2m_e)$$

Производя подстановку табличных значений (см. приложение), получаем:

$$Q = 931,4(22,99414 - 22,98977 - 0,00110) = 3,046 \text{ МэВ}.$$

## Задачи контрольной работы №4.

вариант	номера задач							
	401	418	420	432	445	452	466	474
0	401	418	420	432	445	452	466	474
1	402	415	425	439	447	459	461	478
2	400	413	428	434	441	457	462	475
3	404	410	422	437	440	451	465	473
4	403	416	426	431	443	456	464	470
5	406	419	424	433	446	458	460	472
6	405	411	421	435	444	453	463	477
7	409	414	429	430	442	455	468	479
8	407	412	423	436	448	454	469	476
9	408	417	427	438	449	450	467	471

400. Определить энергетическую светимость абсолютно черного тела, имеющего форму шара радиусом 5 см, если за время  $t = 10$  с с его поверхности излучается энергия 50 кДж.
401. Вычислить энергию, излучаемую за время  $t = 1$  мин с площади  $S = 1 \text{ см}^2$  абсолютно черного тела, температура которого  $T = 1000 \text{ К}$ .
402. Поток энергии, излучаемой из смотрового окошка плавильной печи,  $\Phi = 34 \text{ Вт}$ . Определить температуру печи, если площадь отверстия  $S = 6 \text{ см}^2$ .
403. Определить температуру  $T$  и энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_{\max} = 400 \text{ нм}$ .
404. Температура абсолютно черного тела увеличилась в три раза, в результате чего максимальная длина волны уменьшилась на 600 нм. Определить начальную и конечную температуры тела.
405. Максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при остывании сместился на 400 нм. Найти конечную температуру тела, если первоначальная температура  $T_1 = 6000 \text{ К}$ . Во сколько раз уменьшился излучаемый поток ?
406. Поток излучения абсолютно черного тела  $\Phi = 10 \text{ кВт}$ , максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_{\max} = 0,8 \text{ мкм}$ . Определить площадь  $S$  излучающей поверхности.
407. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{1\max} = 780 \text{ нм}$ ) на фиолетовую ( $\lambda_{2\max} = 390 \text{ нм}$ )?
408. Абсолютно черное тело имеет температуру  $T_1 = 500 \text{ К}$ . Какова будет температура  $T_2$  тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в  $n = 5$  раз ?
409. Температура абсолютно черного тела  $T = 2 \text{ кК}$ . Определить длину волны  $\lambda_{\max}$ , на которую приходится максимум энергии излучения, и  $(r_{\lambda,T})_{\max}$  - спектральную плотность энергетической светимости для этой волны.
410. Определить постоянную Планка и работу выхода электрона из металла, если известно, что при освещении поверхности металла светом с длинами волн 279 и 245 нм задерживающие потенциалы соответственно равны 0,68 и 1,26 В.
411. На вольфрамовую пластинку падают фотоны с энергией 4,9 эВ. Найти максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.
412. Фотон с энергией  $\varepsilon_0 = 10 \text{ эВ}$  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.

413. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,25$  мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов  $U_0 = 0,96$  В. Определить работу выхода  $A$  электрона из металла.
414. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,1$  мкм. Красная граница фотоэффекта равна  $0,3$  мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии ?
415. На поверхность металла падает монохроматический свет с длиной волны  $200$  нм. Красная граница фотоэффекта равна  $600$  нм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону максимальной кинетической энергии?
416. Найти частоту и длину волны света, падающего на пластинку, если работа выхода электронов с поверхности пластинки  $2,3$  эВ, а фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной  $0,96$  В.
417. Какова должна быть длина волны  $\gamma$  - лучей, падающих на платиновую пластинку, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была равна  $V_{max} = 2 \cdot 10^6$  м/с?
418. При фотоэффекте с платиновой поверхности величина задерживающего потенциала равна  $0,8$  В. Найти: 1) длину волны применяемого облучения; 2) максимальную длину волны, при которой еще возможен фотоэффект.
419. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна  $275$  нм. Найти: 1) работу выхода электрона из этого металла ; 2) максимальную скорость электронов, вырывааемых из этого металла светом с длиной волны  $180$  нм; 3) максимальную кинетическую энергию этих электронов.
420. В результате эффекта Комптона на свободных электронах фотон с энергией  $0,51$  МэВ был рассеян на угол  $120^\circ$ . Определить энергию рассеянного фотона.
421. Энергия рентгеновских лучей равна  $0,6$  МэВ. Найти энергию электрона отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на  $25\%$ .
422. Рентгеновские лучи с длиной волны  $70,8$  пм испытывают комптоновское рассеяние на парафине. Найти угол рассеяния, если известно, что длина волны изменилась на  $4,8$  пм. Насколько изменится длина волны при угле рассеяния в  $\pi/2$  ?
423. Рентгеновские лучи с длиной волны  $20$  пм испытывают комптоновское рассеяние под углом  $90^\circ$ . Найти изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии и энергию электрона отдачи.
424. Фотон при эффекте Комптона на свободном электроном был рассеян на угол  $\theta = \pi/2$ . Определить импульс, приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была равна  $1,02$  МэВ.
425. Фотон с длиной волны  $\lambda_1 = 15$  пм рассеян на свободном электроном. Длина волны рассеянного фотона  $\lambda_2 = 16$  пм. Определить угол рассеяния.
426. Фотон с энергией  $\varepsilon = 0,51$  МэВ был рассеян при эффекте Комптона на свободном электроном на угол равный  $160^\circ$ . Определить кинетическую энергию электрона отдачи.
427. Определить угол, на который был рассеян  $\gamma$  - квант с энергией  $\varepsilon_1 = 1,53$  МэВ при эффекте Комптона, если кинетическая энергия электрона отдачи  $E_k = 0,51$  МэВ.
428. Фотон ( $\lambda = 0,001$  нм) рассеян на свободном электроном под углом  $90^\circ$ . Какую долю своей энергии фотон передал электрону?
429. Энергия  $\varepsilon$  падающего фотона равна энергии покоя электрона. Сколько процентов энергии падающего фотона приходится на рассеянный фотон и сколько процентов получает электрон отдачи, если угол рассеяния  $\theta$  равен:  $60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ?
430. Вычислить по теории атома Бора радиус  $r_2$  второй орбиты электрона в атоме водорода. Найти длину волны излучения, испускаемого при переходе электрона с этой орбиты на орбиту с  $n = 1$ .

431. Переход электрона в атоме водорода на орбиту с  $n = 2$  дает излучение с длиной волны 487 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Найти радиус орбиты, с которой перешел электрон.
432. Невозбужденный атом водорода поглотил квант энергии излучения с  $\lambda = 102,6 \text{ нм}$ . Найти радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода по теории Бора.
433. Найти длину волны четвертой спектральной линии серии Бальмера. Определить радиус орбиты, с которой перешел электрон с испусканием указанного излучения.
434. Найти наибольшую и наименьшую длины волн в серии Бальмера атома водорода.
435. Определить энергию фотона, испускаемого атомом водорода при переходе электрона с третьей орбиты на первую.
436. Атом водорода, находящейся в основном состоянии, поглотил фотон с  $\lambda = 0,974 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  и перешел в возбужденное состояние. Найти главное квантовое число, соответствующее этому возбужденному состоянию.
437. Найти максимальную и минимальную энергии фотонов для серии Лаймана ( $n = 1$ ) атома водорода.
438. Определить энергию первого возбужденного и невозбужденного уровней атома водорода.
439. Найти энергию электрона на первых трех уровнях атома водорода.
440. Найти длину волны де Бройля для электрона, движущегося по первой (невозбужденной) орбите атома водорода.
441. Определить длину волны де Бройля для частицы массой  $m = 1 \text{ г}$ , движущейся со скоростью  $V = 10 \text{ м/с}$ .
442. Сравнить длины волн де Бройля для протона и шарика массой  $0,25 \text{ г}$ , движущихся с одинаковой скоростью.
443. Найти длину волны де Бройля электрона, имеющего импульс  $p = 8 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .
444. Найти длину волны де Бройля для электрона находящегося на третьем ( $n = 3$ ) энергетическом уровне в атоме водорода.
- Указание: импульс электрона  $p = \sqrt{2m_e |E_n|}$ ; кинетическая энергия на уровне  $n$  составляет  $E_k = |E_n|$
445. Какова неточность в определении координаты маятника массой  $100 \text{ г}$ , имеющего скорость  $2 \text{ м/с}$ , если его импульс найден с неопределенностью  $\Delta p = 10^{-6} p$  ?
446. Оценить наименьшую ошибку  $\Delta V$  в определении скорости электрона, если координата его центра масс установлена с неопределенностью  $\Delta X = 1 \text{ мкм}$ .
447. Оценить наименьшую ошибку  $\Delta V$  в определении скорости протона, если координата его центра масс установлена с неопределенностью  $\Delta X = 2 \text{ мкм}$ .
448. Электрон с кинетической энергией  $E_k = 10 \text{ эВ}$  находится в металлической пылинке диаметром  $d = 1 \text{ мкм}$ . Оценить (в процентах) относительную неопределенность скорости электрона.
449. Определить неопределенность  $\Delta X$  координаты электрона, движущегося в атоме водорода по второй боровской орбите, если неопределенность скорости  $\Delta V = 0,1 \cdot V$ .
450. Найти постоянную распада радона, если за сутки число атомов радона уменьшается на  $18,2\%$ .
451. Некоторый радиоактивный препарат обладает постоянной распада  $\lambda = 144 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$ . Через сколько времени распадется  $75\%$  первоначального количества атомов?
452. В ампулу помещен радон, активность которого равна,  $a = 400 \text{ мкКи}$  ( $1 \text{ кюри} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./с}$ ). Через сколько времени радон будет давать  $2,22 \cdot 10^9 \text{ расп./с}$  ?
453. Активность некоторого радиоактивного изотопа в начальный момент времени составляет  $100 \text{ Бк}$ . Определите активность этого изотопа по истечении промежутка времени, равного половине периода полураспада.



454. За какое время распадется  $\frac{1}{4}$  начального количества ядер препарата, если период его полураспада 48 часов?
455. Сколько процентов начального количества актиния останется: через 10 дней, через 30 дней? ( $T_{Ac} = 8,64 \cdot 10^5$  с).
456. За один год начальное количество радиоактивного препарата уменьшилось в 6 раз. Во сколько раз оно уменьшится за 2 года ?
457. Найти начальную активность 1 г магния  ${}^{27}_{12}\text{Mg}$  ( $T_{Mg} = 600$  с).
458. Счетчик импульсов зарегистрировал при первом измерении распада изотопа серебра 5200 импульсов в минуту, а через 1 сутки – 2800 импульсов. Найти период полураспада изотопа.
459. Найти начальную удельную активность тория  ${}^{229}_{90}\text{Th}$ , если период полураспада его составляет  $2,2 \cdot 10^{11}$  с.
460. Найти энергию связи ядра изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$ .
461. Найти энергию связи ядра атома алюминия  ${}^{30}_{13}\text{Al}$ .
462. Найти энергию связи ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$ .
463. Найти удельную энергию связи (приходящуюся на один нуклон) ядра азота  ${}^{14}_7\text{N}$ .
464. Найти удельную энергию связи (приходящуюся на один нуклон) ядра кальция  ${}^{44}_{20}\text{Ca}$ .
465. Найти массу нейтрального атома, если ядро его состоит из двух протонов и двух нейтронов, а энергия связи ядра равна 26,3 МэВ.
466. Дефект массы ядра  ${}^{14}_7\text{N}$  равен 0,11243 а.е.м. Найти массу атома.
467. Определить дефект массы и энергию связи ядра  ${}^{16}_8\text{O}$ .
468. Найти дефект массы и удельную энергию связи ядра атома  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ .
469. Во сколько раз отличается удельная энергия связи ядер  ${}^7_3\text{Li}$  и  ${}^8_4\text{Be}$ ?
470. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ .
471. Определить энергию, освобождающуюся при реакции  ${}^6_3\text{Li}(p, \alpha){}^3_2\text{He}$
472. Написать недостающие обозначения (вместо X) в следующих ядерных реакциях: 1)  ${}^{14}_7\text{N}(n, X){}^{14}_6\text{C}$ ; 2)  $X(p, \alpha){}^{22}_{11}\text{Na}$ ; 3)  ${}^{27}_{13}\text{Al}(n, \alpha)X$ .
473. При бомбардировке изотопа азота  ${}^{14}_7\text{N}$  нейтронами получается изотоп углерода  ${}^{14}_6\text{C}$ , который оказывается  $\beta$ - радиоактивным. Написать уравнения обеих реакций.
474. Найти энергию, выделяющуюся при термоядерной реакции:  
 ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \longrightarrow {}^1_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$
475. Вычислить энергию ядерной реакции:  ${}^{16}_8\text{O}(d, \alpha){}^{14}_7\text{N}$ . Освобождается или поглощается эта энергия?
476. Найти энергию ядерной реакции  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{14}_6\text{C}$
477. Освобождается или поглощается энергия ядерной реакции  ${}^2_1\text{H}(d, p){}^3_1\text{H}$
478. Написать недостающие обозначения (вместо X) в следующих ядерных реакциях: 1)  ${}^{55}_{25}\text{Mn}(X, n){}^{55}_{26}\text{Fe}$ ; 2)  ${}^{19}_6\text{F}(p, X){}^{16}_8\text{O}$ ; 3)  ${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, p)X$ .
479. Найти энергию, выделяющуюся при реакции:  
 ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \longrightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ .

### 1. Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Элементарный заряд	$e$	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	$c$	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная закона смещения Вина	$v$	$2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Планка	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar$	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$R$	$1,10 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Боровский радиус	$a_0$	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Комптоновская длина в волноволны волны электрона	$\Lambda_K$	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Магнетон Бора	$\mu_B$	$0,927 \cdot 10^{-23}$ А·м <sup>2</sup>
Атомная единица массы	а.е.м	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

### 2. Работа выхода электрона

металл	А, Дж	А, эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,8 \cdot 10^{-19}$	2,4
Платина	$8,5 \cdot 10^{-19}$	6,3
Рубидий	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цезий	$3,0 \cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6,8 \cdot 10^{-19}$	4,0
Вольфрам	$7,2 \cdot 10^{-19}$	4,5

### 3. Массы нейтральных атомов (в атомных единицах массы)

Элемент	№	Изотоп	Масса
Водород	1	<sup>1</sup> Н	1,00783
		<sup>2</sup> Н	2,01410
		<sup>3</sup> Н	3,01605
Гелий	2	<sup>3</sup> He	3,01603
		<sup>4</sup> He	4,00260

Литий	3	${}^6\text{Li}$	6,01513
		${}^7\text{Li}$	7,01601
Бериллий	4	${}^7\text{Be}$	7,01693
		${}^8\text{Be}$	8,00785
		${}^9\text{Be}$	9,01219
		${}^{10}\text{Be}$	10,01354
Бор	5	${}^9\text{B}$	9,01333
		${}^{10}\text{B}$	10,01294
		${}^{11}\text{B}$	11,00931
Углерод	6	${}^{10}\text{C}$	10,00168
		${}^{12}\text{C}$	12,00000
		${}^{13}\text{C}$	13,00335
		${}^{14}\text{C}$	14,00324
Азот	7	${}^{13}\text{N}$	13,00574
		${}^{14}\text{N}$	14,00307
		${}^{15}\text{N}$	15,00011
Кислород	8	${}^{16}\text{O}$	15,99491
		${}^{17}\text{O}$	16,99913
		${}^{18}\text{O}$	17,99916
Фтор	9	${}^{19}\text{F}$	18,99840
Натрий	11	${}^{22}\text{Na}$	21,99444
		${}^{23}\text{Na}$	22,98977
Магний	12	${}^{23}\text{Mg}$	22,99414
		${}^{24}\text{Mg}$	23,99267
Алюминий	13	${}^{30}\text{Al}$	29,99817
		${}^{27}\text{Al}$	26,99010
Кремний	14	${}^{30}\text{Si}$	29,98325
		${}^{31}\text{Si}$	30,97535
Фосфор	15	${}^{31}\text{P}$	30,97376
Калий	19	${}^{41}\text{K}$	40,96784
Кальций	20	${}^{44}\text{Ca}$	43,95549
Свинец	82	${}^{206}\text{Pb}$	205,99446
Полоний	84	${}^{210}\text{Po}$	209,98297
Уран	92	${}^{235}\text{U}$	235,11750
		${}^{238}\text{U}$	238,12376

#### 4. Масса и энергия покоя некоторых элементарных частиц и легких ядер

Частица	Масса		МэВ
	кг	а.е.м	
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	1876
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	3733

#### 5. Период полураспада некоторых радиоактивных изотопов

Изотоп	Тип распада	Период полураспада
Актиний ${}_{89}^{235}\text{Ac}$	$\alpha$	10сут = $8,64 \cdot 10^5$ с
Кобальт ${}_{27}^{60}\text{Co}$	$\beta^-$ , $\gamma$	5,3года = $1,7 \cdot 10^8$ с
Йод ${}_{58}^{131}\text{I}$	$\beta^-$ , $\gamma$	8сут = $6,9 \cdot 10^5$ с
Магний ${}_{12}^{27}\text{Mg}$	$\beta^-$	10мин = 600с
Радий ${}_{88}^{219}\text{Ra}$	$\alpha$	$10^{-2}$ с
Радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$	$\alpha$ , $\gamma$	1620лет = $5,12 \cdot 10^{10}$ с
Радон ${}_{86}^{222}\text{Rn}$	$\alpha$	3,8сут = $3,28 \cdot 10^5$ с
Стронций ${}_{38}^{90}\text{Sr}$	$\beta^-$	28лет = $8,35 \cdot 10^8$ с
Торий ${}_{90}^{229}\text{Th}$	$\alpha$ , $\gamma$	700лет = $2,2 \cdot 10^{11}$ с
Уран ${}_{92}^{238}\text{U}$	$\alpha$ , $\gamma$	$4,9 \cdot 10^9$ лет = $1,4 \cdot 10^{17}$ с
Уран ${}_{92}^{235}\text{U}$	$\alpha$	$7 \cdot 10^8$ лет = $2,21 \cdot 10^{16}$ с