

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный технический университет**

Кафедра физики



**ФИЗИКА**

***Оптика, атомная и ядерная физика:  
контрольные задания и учебные материалы***

Учебно-методическое пособие  
для студентов МИДО

Учебное электронное издание

**Минск ♦ БНТУ ♦ 2011**

УДК 530.1(075.8)

**Авторы:**

*П.Г. Кужир, И.А. Сатиков, Н.П. Юркевич*

**Рецензенты:**

*И.Р. Гулаков, д. ф.-м. н., профессор кафедры общей физики БГУ;*

*М.А. Князев, д. ф.-м. н., профессор кафедры «Техническая физика» БНТУ*

Учебно-методическое пособие содержит учебные материалы и контрольные задания по оптике, атомной и ядерной физике. Приведена учебная программа по соответствующим разделам физики, сформулированы методические требования, предъявляемые к выполнению и оформлению контрольных работ. Пособие предназначено для студентов инженерно-технических специальностей дистанционной формы обучения.

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37  
E-mail: [NPYurkevich@mail.ru](mailto:NPYurkevich@mail.ru) ;  
Регистрационный № БНТУ/МИДО-6.2011

© Кужир П.Г., Сатиков И.А., Юркевич  
Н.П., 2011

© Юркевич Н.П., компьютерный дизайн,  
2011

© БНТУ, 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебно-методическое пособие ставит своей целью оказать помощь студентам, обучающимся по дистанционной форме образования, в изучении физики. Знание законов физики предполагает не только умение формулировать законы, но и применять их при решении задач. Как правило, решение задач вызывает наибольшие затруднения у студентов. В соответствии с этим учебный материал представлен таким образом, чтобы студенты самостоятельно смогли решать задачи своего варианта.

Вначале помещена рабочая программа по разделам оптика, атомная и ядерная физика. Сформулированы методические указания по выполнению контрольных работ и правила округления чисел. По всем разделам программы приведены основные формулы и законы, необходимые при решении задач, а также примеры решения задач.

Задачи для контрольных работ состоят из десяти вариантов, в каждом варианте восемь задач. Выбор варианта студент осуществляет по таблице. Задачи подобраны так, чтобы способствовать более глубокому пониманию основных законов физики, предусмотренных программой и способствовать развитию логического мышления.

## УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА КУРСА ФИЗИКИ, Ч. 3

Развитие представлений о природе света. Световая волна. Показатель преломления среды. Законы геометрической оптики. Тонкие линзы. Аберрации оптических систем. Световой поток. Фотометрические величины и их единицы. Элементы электронной оптики.

### **Раздел 4. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

#### **Тема 26. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА**

Принцип суперпозиции волн. Когерентность и монохроматичность световых волн. Время, длина и радиус пространственной когерентности. Закон сложения интенсивностей. Интерференция света. Оптическая разность хода. Условия интерференционных минимумов и максимумов. Методы наблюдения интерференции (метод Юнга, зеркала Френеля, бипризма Френеля). Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Интерференция света в тонких пленках. Полосы равного наклона. Полосы равной толщины. Кольца Ньютона. Интерференция многих волн. Просветление оптики. Интерферометры. Интерферометр Майкельсона.

## **Тема 27. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА**

Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейность распространения света. Зонные пластинки. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на одной щели и на дифракционной решетке. Спектральное разложение света на дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция рентгеновских лучей на пространственной структуре. Формула Вульфа-Брэггов. Рентгеноструктурный анализ. Рентгеновская спектроскопия. Понятие о голографии.

## **Тема 28. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА**

Естественный и поляризованный свет. Виды поляризации света. Степень поляризации. Закон Малюса. Поляризация при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков. Закон Брюстера. Стопа Столетова. Двойное лучепреломление. Обыкновенный и необыкновенный лучи. Одноосные и двухосные кристаллы. Оптическая ось и главная плоскость кристалла. Дихроизм. Поляроиды и поляризационные призмы. Поляризаторы и анализаторы. Кристаллическая пластинка между двумя поляризаторами. Пластинки в четверть волны и в полволны. Искусственная оптическая анизотропия. Возникновение искусственной анизотропии под действием механических напряжений. Эффект Керра. Вращение плоскости поляризации. Оптически активные вещества. Эффект Фарадея.

## **Тема 29. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсия. Групповая скорость. Электронная теория дисперсии. Поглощение света. Закон Бугера. Спектры поглощения. Рассеяние света. Эффект Доплера. Излучение Вавилова-Черенкова.

## **Раздел 5. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ**

### **Тема 30. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ**

Тепловое излучение и его характеристики. Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения (законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина, формула Рэлея-Джинса). Трудности классической теории теплового излучения. Квантовая гипотеза и формула Планка. Вывод законов теплового излучения из формулы Планка. Оптическая пирометрия.

Фотоэффект. Виды фотоэффекта. Законы внешнего фотоэффекта. Фотоны. Формула Эйнштейна. Многофотонный фотоэффект. Применение фотоэффекта. Энергия и импульс фотона. Давление света. Эффект Комптона. Корпускулярные и волновые свойства электромагнитного излучения.

### **Тема 31. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ**

Линейчатый спектр атома водорода. Постулаты Бора. Теория Бора водородоподобного атома. Опыт Франка и Герца. Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов Опыт Дэвиссона и Джермера. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Волновая функция и ее свойства. Нормировка волновой функции. Принцип суперпозиции состояний. Статистическая интерпретация волновой функции.

### **Тема 32. УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА**

Общее (нестационарное) уравнение Шредингера. Уравнение Шредингера для стационарных состояний. Принцип причинности в квантовой механике. Стационарные состояния. Свободная частица. Частица в одномерной прямоугольной бесконечно глубокой потенциальной яме. Уровни энергии. Главное квантовое число. Принцип соответствия Бора. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект. Квантовый линейный гармонический осциллятор.

### **Тема 33. ФИЗИКА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ**

Квантовомеханическая модель атома водорода. Водородоподобные атомы. Энергетические уровни. Квантовые числа. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Механические и магнитные моменты электронов и атомов. Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана. Атом в электрическом поле. Эффект Штарка. Принцип неразличимости тождественных частиц. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по оболочкам. Периодическая система элементов. Энергетические уровни молекул. Молекула водорода. Химические связи. Обменное взаимодействие. Ионная и ковалентная связь. Электронные, колебательные и вращательные состояния многоатомных молекул.

### **Тема 34. ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ**

Спектры атомов и молекул. Рентгеновские спектры. Закон Мозли. Молекулярные спектры. Комбинационное рассеяние света. Спектральный анализ. Люминесценция. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение света. Коэффициенты Эйнштейна для переходов в двухуровневой системе. Принцип работы лазера. Различные типы лазеров.

### **Тема 35. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ**

Квантовая статистика. Статистика Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Квазичастицы. Фотонный газ. Фононный газ. Сверхтекучесть. Электронный газ в металлах. Энергия Ферми. Сверхпроводимость. Высокотемпературная сверхпроводимость. Эффект Джозефсона.

## **Тема 36. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Зонная теория твердых тел. Распределение электронов по энергиям. Уровень Ферми. Металлы, диэлектрики и проводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Электроны проводимости и дырки. Доноры и акцепторы. Фотоэффект в полупроводниках. Люминесценция твердых тел. Люминесцентный анализ. Люминесцентная дефектоскопия. Контактные явления. Ряд Вольта. Контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления. Эффект Зеебека. Эффект Пельтье. Эффект Томсона. Применение термоэлектрических явлений. Контакт металл-полупроводник. Контакт электронного и дырочного полупроводников (р-п переход). Вольт-амперная характеристика р-п перехода. Полупроводниковые диоды и транзисторы, интегральные схемы.

## **Раздел 6. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**

### **Тема 37. АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**

Строение атомного ядра. Дефект масс и энергия связи. Модели ядра. Ядерные силы. Радиоактивность. Виды ионизирующего излучения:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ -излучение. Закон радиоактивного распада. Взаимодействие радиационного излучения с веществом. Биологическое действие ионизирующих излучений. Ядерные реакции и их основные типы. Цепная реакция деления. Ядерный реактор. Ядерная энергетика. Экологические проблемы ядерной энергетика. Термоядерные реакции синтеза. Проблема управляемых термоядерных реакций.

Виды фундаментальных взаимодействий. Классификация элементарных частиц. Частицы и античастицы.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

По курсу физики студент должен выполнить контрольные работы, количество которых определено учебным планом специальности. При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие правила:

1. Номера задач, которые студент должен включить в свою контрольную работу, следует определить по таблице вариантов.
2. На титульном листе необходимо указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес.

3. Контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента.

4. Задачу своего варианта переписывать полностью, а заданные физические величины выписывать отдельно; при этом все численные величины должны быть представлены в одной системе единиц (СИ).

5. Для пояснения решения задачи, где это нужно, сделать чертеж.

6. Решение задач и выбор используемых при этом формул следует сопровождать пояснениями.

7. В пояснениях к задаче необходимо указывать основные законы и формулы, на использовании которых базируется решение данной задачи.

8. При получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод.

9. Решение задачи рекомендуется сначала сделать в общем виде (в буквенных обозначениях), давая при этом необходимые пояснения.

10. Вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых значений в расчетную формулу.

11. Проверить единицы полученных величин по расчетной формуле, тем самым подтвердив ее правильность.

12. В контрольной работе следует указывать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

13. Результаты расчета следует округлять.

Правила округления следующие:

– при сложении и вычитании все слагаемые округляют так, чтобы они не имели значащих цифр в тех разрядах, которые отсутствуют хотя бы в одном из слагаемых;

– при умножении и делении исходные данные и результат округляют до такого числа значащих цифр, сколько их содержится в наименее точном числе;

– при возведении в степень в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их содержится в числе, возводимом в степень;

– при извлечении корня в окончательном результате количество значащих цифр должно быть таким, как в подкоренном выражении;

– в промежуточных вычислениях следует сохранять на одну цифру больше, чем рекомендуют правила, приведенные выше.

Значащими цифрами называют все цифры, кроме нуля, и ноль, если он стоит в середине числа или является представителем сохраненного десятичного разряда.

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, не относящиеся к требуемому варианту, засчитываться не будут.

При отсылке работы на повторное рецензирование обязательно представлять работу с первой рецензией.

## ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Таблица 1

Варианты контрольной работы  
для специальностей, учебными планами которых  
предусмотрена по физике одна работа в семестре

<i>Варианты</i>	<i>Номера задач</i>							
1	501	511	521	531	541	551	561	571
2	502	512	522	532	542	552	562	572
3	503	513	523	533	543	553	563	573
4	504	514	524	534	544	554	564	574
5	505	515	525	535	545	555	565	575
6	506	516	526	536	546	556	566	576
7	507	517	527	537	547	557	567	577
8	508	518	528	538	548	558	568	578
9	509	519	529	539	549	559	569	579
0	510	520	530	540	540	550	560	580

## ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ

Оптика – раздел физики, занимающийся изучением природы света, закономерностей его испускания, распространения и взаимодействия с веществом.

Экспериментально установлено, что действие света на устройства для его регистрации определяет вектор электрической напряженности  $\vec{E}$  электромагнитного поля световой волны. Его в оптике называют световым вектором.

Скорость света в среде:

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

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $n$  – показатель преломления среды.

Явление интерференции света состоит в перераспределении световой энергии в пространстве при наложении когерентных волн, т.е. во взаимном усилении этих волн в одних точках пространства и ослаблении – в других.

Необходимым условием интерференции волн является их когерентность. Волны одинаковой частоты, которые приходят в данную точку с разностью фаз не изменяющейся с течением времени, называются когерентными.

Оптическая длина пути световой волны:

$$L = n\ell,$$

где  $\ell$  – геометрическая длина пути световой волны;

$n$  – показатель преломления среды.

Оптическая разность хода двух световых волн:

$$\Delta = L_1 - L_2 = n_1\ell_1 - n_2\ell_2.$$

Связь между разностью фаз и оптической разностью хода световых волн:

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

Условие усиления света при интерференции:

$$\Delta = \pm m\lambda; \quad \Delta\varphi = 2\pi m; \quad (m = 1, 2, \dots).$$

Условие ослабления света:

$$\Delta = \pm(2m-1)\frac{\lambda}{2}; \quad \Delta\varphi = (2m-1)\pi; \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Оптическая разность хода световых волн при отражении от пленки, находящейся в воздухе или в вакууме.

$$\Delta = 2d n \cos i_2 + \frac{\lambda_0}{2}; \quad \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \frac{\lambda_0}{2},$$

где  $n$  – показатель преломления пленки;

$d$  – ее толщина;

$i_1$  – угол падения;

$i_2$  – угол преломления;

$\lambda_0$  – длина волны света в вакууме.

Радиус светлых  $r_m^{\text{CB}}$  колец Ньютона в отраженном свете:

$$r_m^{\text{CB}} = \sqrt{(2m-1)R\lambda/2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

радиус темных  $r_m$  колец Ньютона в отраженном свете:

$$r_m = \sqrt{m R \lambda} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $m$  – номер кольца;

$R$  – радиус кривизны линзы.

В проходящем свете:

$$\text{светлые кольца} - r_m^{\text{CB}} = \sqrt{m R \lambda} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

$$\text{темные кольца} - r_m = \sqrt{(2m-1) R \lambda / 2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Дифракцией света называются явления, обуславливающие отклонения от законов геометрической оптики при распространении света в среде с резкими неоднородностями.

Условие максимума при дифракции на одной щели:

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

где  $a$  – ширина щели;

$m$  – порядковый номер максимума;

$\varphi$  – угол дифракции, соответствующий  $m$ -му максимуму.

Угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующий максимуму при дифракции света на дифракционной решетке, определяется из условия:

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

где  $d$  – период (постоянная) дифракционной решетки;

$d = a + b$ ,  $a$  – ширина щели;

$b$  – ширина непрозрачного промежутка.

Разрешающая способность дифракционной решетки:

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

где  $\Delta \lambda$  – наименьшая разность длин волн двух спектральных линий с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta \lambda$ , при которой эти линии видны раздельно в спектре, полученном на дифракционной решетке;

$N$  – полное число щелей решетки.

Пространственной (трехмерной) дифракционной решеткой называется такая оптически неоднородная среда, неоднородности которой периодически повторяются при изменении всех трех пространственных координат. Примером пространственной дифракционной решетки является кристаллическая решетка твердого тела.

Дифракционные максимумы при дифракции рентгеновских лучей на кристаллах удовлетворяют условию Вульфа-Брэгга:

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

где  $m = 1, 2, 3, \dots$  – порядок дифракционного максимума;

$d$  – расстояние между атомными плоскостями кристалла;

$\Theta$  – угол между направлениями параллельного пучка рентгеновских лучей, падающих на кристалл, и атомной плоскостью в кристалле.

Свет, у которого направление колебаний светового вектора  $E$  упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным.

Свет называется естественным, если ни одно из направлений колебаний вектора  $E$  не является преимущественным.

Свет называют частично поляризованным, если в нем имеется преимущественное направление колебаний вектора  $E$ .

Если колебания  $E$  происходят параллельно одной плоскости, то такой свет является плоско- (или линейно-) поляризованным.

Если конец вектора  $E$  описывает окружность, то такой свет называют поляризованным по кругу.

Если при падении естественного света под углом  $i_B$  на границу раздела двух прозрачных диэлектриков выполняется условие:

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

то отраженный луч будет полностью поляризован (закон Брюстера), степень поляризации преломленного луча достигает наибольшего значения, угол между отраженным и преломленным лучами равен  $90^\circ$ .

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется тепловым излучением.

Энергетической светимостью называется величина  $R_e$ , численно равная энергии электромагнитных волн всевозможных длин (частот) от 0 до  $\infty$ , излучаемых за единицу времени с единицы площади тела.

Закон Стефана-Больцмана:

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

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана;

$T$  – термодинамическая температура.

Лучеиспускательной способностью или спектральной плотностью энергетической светимости тела называют величину  $r^{\lambda, T}$ , численно равную энергии теплового излучения тела в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$  за единицу времени с единицы площади тела отнесенной к величине интервала длин волн  $d\lambda$ .

Величина  $I_{\lambda,T}$  имеет максимум при некотором значении  $\lambda_m$ .

Закон смещения Вина:

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

где  $\lambda_m$  – длина волны, на которую приходится максимум величины  $I_{\lambda,T}$ ;

$b$  – постоянная закона смещения Вина ( $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м·К).

Энергия фотона:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda_0},$$

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

$\nu$  – частота света;

$\lambda_0$  – длина волны света в вакууме;

$c$  – скорость света в вакууме.

Масса фотона:

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda_0 c}.$$

Импульс фотона:

$$p = \frac{h}{\lambda_0} = \frac{h\nu}{c}.$$

Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda_0} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

где  $A$  – работа выхода электрона с поверхности вещества;

$v_{\max}$  – максимальная скорость фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_k = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_k = \frac{hc}{A},$$

где  $\nu_k$  – минимальная частота света;

$\lambda_k$  – максимальная длина волны, при которой еще возможен фотоэффект.

Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Протон – положительно заряженная частица, имеющая заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Нейтрон не имеет электрического заряда.

Зарядом ядра называется величина  $Ze$ , где  $Z$  – порядковый номер химического элемента в периодической системе.  $Z$  равно числу протонов в ядре,  $A = Z + N$  – массовое число,  $N$  – число нейтронов в ядре.

Радиоактивностью называют превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающиеся испусканием некоторых частиц.

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону радиоактивного распада:

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

где  $N_0$  – количество радиоактивных ядер в образце в начальный момент времени  $t = 0$ ;

$N$  – количество радиоактивных ядер в том же образце в момент времени  $t$ ;

$\lambda$  – постоянная распада.

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

$T_{1/2}$  – период полураспада – промежуток времени, за который число не распавшихся ядер уменьшится вдвое.

Активность  $A$  радиоактивного образца равна числу распадов ядер, произошедших за единицу времени:

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

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad A_0 = \lambda N_0.$$

где  $A_0$  – активность образца в начальный момент времени  $t = 0$ ;

$A$  – активность образца в времени  $t$ .

Единица измерения активности – беккерель (Бк) – один распад в одну секунду.

Число атомов, содержащихся в радиоактивном образце массы  $m$ :

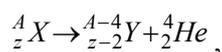
$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где  $M$  – молярная масса изотопа;

$N_A$  – постоянная Авогадро.

Ядра атомов радиоактивного вещества неустойчивы, они самопроизвольно распадаются, испуская либо альфа-, либо бета- частицы, превращаясь при этом в ядра нового элемента. Радиоактивный альфа- и бета-распад многих ядер сопровождается гамма-излучением. Гамма-лучи являются жестким электромагнитным излучением, энергия которого высвобождается при переходах ядер из возбужденного в основное или в менее возбужденное состояние.

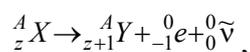
Альфа распад испытывают только тяжелые ядра с  $A > 200$ :



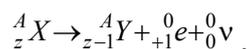
${}^4_2\text{He}$  – ядро атома гелия представляет собой альфа-частицу.

Под бета-распадом понимают три вида ядерных превращений: электронный ( $\beta^-$ ) распад, позитронный ( $\beta^+$ ) распад и электронный захват.

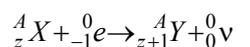
$\beta^-$  – распад (испускается электрон  ${}^0_{-1}e$ ):



$\beta^+$  – распад (испускается позитрон  ${}^0_{+1}e$ ):



электронный захват:



${}^0_0 \nu$  и  ${}^0_0 \tilde{\nu}$  – нейтрино и антинейтрино, выделяющиеся в реакциях  $\beta$  – распада ядер.

Энергия связи ядра равна работе, которую нужно затратить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны.

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m,$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$\Delta m$  – дефект массы.

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

где  $m_p$  и  $m_n$  – массы протона и нейтрона;

$m_{\text{я}}$  – масса ядра.

В справочниках приводятся не массы ядер, а массы атомов, тогда формула для дефекта массы ядер может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_A,$$

где  $m_H$  – масса атома водорода;

$m_A$  – масса соответствующего элемента.

Во внесистемных единицах энергия связи ядра:

$$E_{\text{св}} = 931,5 \Delta m \text{ (МэВ)},$$

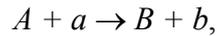
где дефект массы  $\Delta m$  берут в а.е.м.

Удельная энергия связи (энергия связи на один нуклон):

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции символически записываются в виде:



где  $A$  и  $B$  – исходное и конечное ядра;

$a$  и  $b$  – исходная и конечная частицы в реакции.

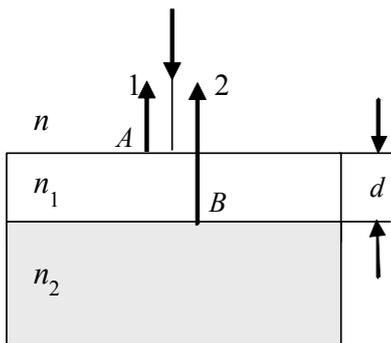
Энергия ядерной реакции:

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

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы;

$m_3$  и  $m_4$  – массы покоя ядер продуктов реакции.

Если  $Q < 0$ , то энергия поглощается, если  $Q > 0$ , то реакция идет с выделением энергии.



## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1.** Для уменьшения потерь света при отражении от стекла на поверхность объектива ( $n_2 = 1,7$ ) нанесена тонкая прозрачная пленка ( $n_1 = 1,3$ ). При какой наименьшей толщине ее произойдет максимальное ослабление отраженного света, длина волны которого  $\lambda = 560$  нм? Считать, что лучи падают нормально к поверхности объектива.

**Решение:** Свет, падая на объектив, отражается как от передней, так и от задней поверхностей тонкой пленки. Ход лучей изображен на рисунке. Отраженные лучи 1 и 2 интерферируют между собой. Так как показатель преломления воздуха ( $n = 1,0$ ) меньше показателя преломления вещества пленки ( $n_1 = 1,3$ ), который, в свою очередь, меньше показателя преломления стекла ( $n_2 = 1,7$ ), то в обоих случаях отражение происходит от среды, оптически более плотной, чем та среда, в которой распространяется падающий луч. Поэтому фаза колебаний луча 1 при отражении в точке  $A$  изменяется на  $\pi$  радиан, и точно так же на  $\pi$  изменяется фаза луча 2 при отражении в точке  $B$ . Следовательно, результат интерференции этих лучей будет такой же, как если бы никакого изменения фазы колебаний ни у того, ни у другого луча не было.

Результирующая интенсивность минимальна, если оптическая разность хода интерферирующих лучей 1 и 2 равна нечетному числу полуволен,

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 при нормальном падении лучей на пленку ( $i_1 = 0$ ) равна

$$\Delta = 2dn_1. \quad (2)$$



$$d = \frac{r_m^2}{2R}$$

Радиус темного кольца

$$r_k = \sqrt{2 R d} = \sqrt{\frac{R k \lambda}{n}} ;$$

$$r_4 = \sqrt{\frac{5 \cdot 4 \cdot 589 \cdot 10^{-9}}{1,33}} = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

**Ответ:**  $r_4 = 2,97$  мм.

**Пример 3.** Плосковыпуклая стеклянная линза с оптической силой  $D = 2$  дптр выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус  $r_k$  четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 0,7 мм. Определить длину световой волны.

**Решение:** Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете определяются по формуле

$$r_m = \sqrt{m R \lambda} ,$$

где  $m$  – номер кольца;

$R$  – радиус линзы;

$\lambda$  – длина световой волны.

Выразим из этой формулы  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{r_m^2}{m R} \tag{1}$$

Радиус линзы можно определить, воспользовавшись формулой линзы:

$$D = \frac{1}{F} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) ,$$

где  $D$  – оптическая сила линзы;

$F$  – фокусное расстояние;

$n$  – показатель преломления;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы поверхностей линзы.

Так как линза плосковыпуклая ( $R_2 = \infty$ ), то

$$D = \frac{1}{F} = (n-1) \frac{1}{R} ;$$

$$R = \frac{n-1}{D} \tag{2}$$

Подставив (2) в (1), получим

$$\lambda = \frac{r_m^2 \cdot D}{m(n-1)} = \frac{(0,7 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2}{4 \cdot (1,5-1)} = 0,49 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 490 \text{ нм}$$

**Ответ:**  $\lambda = 490 \text{ нм}$ .

**Пример 4.** На дифракционную решетку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет. Период решетки  $d = 2 \text{ мкм}$ . Определить наибольший порядок дифракционного максимума который дает эта решетка в случае красного ( $\lambda_1 = 0,7 \text{ мкм}$ ) и в случае фиолетового ( $\lambda_2 = 0,41 \text{ мкм}$ ) света.

**Решение:** Из формулы, определяющей положение главных максимумов дифракционной решетки, найдем порядок  $m$  дифракционного максимума

$$m = (d \sin \varphi) / \lambda, \quad (1)$$

где  $d$  – период решетки;

$\varphi$  – угол дифракции;

$\lambda$  – длина волны монохроматического света.

Так как  $\sin \varphi$  не может быть больше 1, то число  $m$  не может быть больше  $d/\lambda$ , т.е.

$$m \leq d/\lambda. \quad (2)$$

Подставив в формулу (2) значения величин, получим:

$$m \leq 2/0,7 = 2,86 \quad (\text{для красных лучей});$$

$$m \leq 2/0,41 = 4,88 \quad (\text{для фиолетовых лучей}).$$

Если учесть, что порядок максимумов является целым числом, то для красного света  $m_{\max} = 2$ , а для фиолетового  $m_{\max} = 4$ .

**Ответ:**  $m_{\max\text{кр}} = 2$ ;  $m_{\max\text{ф}} = 4$ .

**Пример 5.** Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света образует угол  $\varphi = 97^\circ$  с падающим пучком (см. рис.). Определить показатель преломления  $n_1$  жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.

**Решение:** Согласно закону Брюстера, пучок света, отраженный от диэлектрика, максимально поляризован в том случае, если:

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

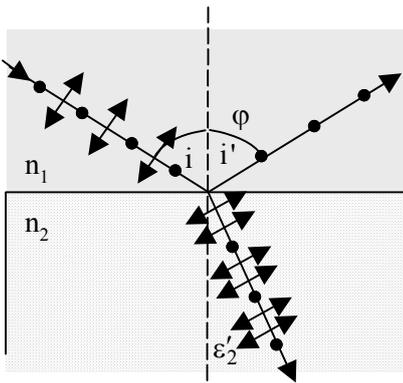
где  $n_{21}$  – показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости).

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления. Следовательно,  $\operatorname{tg} i = n_2 / n_1$ .

Так как угол падения равен углу отражения, то  $i = \varphi / 2$  и, следовательно,  $\operatorname{tg}(\varphi / 2) = n_2 / n_1$ , откуда

$$n_1 = \frac{n_2}{\operatorname{tg}(\varphi / 2)}.$$

Произведем вычисления



$$n_1 = \frac{1,5}{\operatorname{tg}(97^\circ / 2)} = \frac{1,5}{1,13} = 1,33.$$

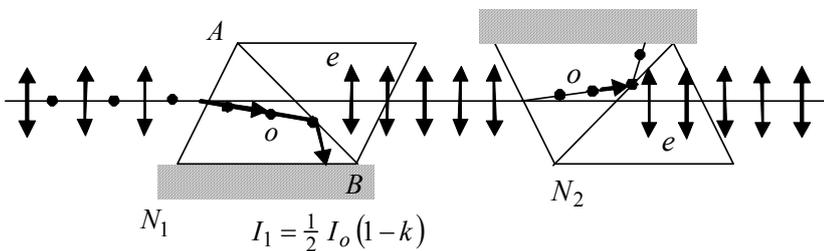
**Ответ:**  $n_1 = 1,33$ .

**Пример 6.** Два николя  $N_1$  и  $N_2$  расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет  $\alpha = 60^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность  $I_0$  естественного света:

- 1) при прохождении через один николю  $N_1$ ;
- 2) при прохождении через оба николя. Потери интенсивности света на отражение и поглощение в каждом николе составляет 5%.

**Решение:** 1) Естественный свет, падая на грань призмы Николя (см. рисунок), расщепляется вследствие двойного лучепреломления на два пучка: обыкновенный и необыкновенный. Оба пучка одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы. Плоскость колебаний необыкновенного пучка лежит в плоскости чертежа (плоскость главного сечения).

$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k)^2 \cos^2 \alpha$$



ПЛОСКОСТЬ КОЛЕБАНИЙ ОБЫКНОВЕННОГО ПУЧКА ПЕРПЕНДИКУЛЯРНА ПЛОСКОСТИ ЧЕРТЕЖА. ОБЫКНОВЕННЫЙ ПУЧОК СВЕТА ( $O$ ) ВСЛЕДСТВИЕ ПОЛНОГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ ГРАНИЦЫ  $AB$  ОТБРАСЫВАЕТСЯ НА ЗАЧЕРНЕННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИЗМЫ И ПОГЛОЩАЕТСЯ ЕЮ. НЕОБЫКНОВЕННЫЙ ПУЧОК ( $E$ ) ПРОХОДИТ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ, УМЕНЬШАЯ СВОЮ ИНТЕНСИВНОСТЬ ВСЛЕДСТВИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ. ТАКИМ ОБРАЗОМ, ИНТЕНСИВНОСТЬ СВЕТА, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ,

$$I_1 = 1/2 I_0 (1 - k).$$

Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении первого николя найдем, разделив интенсивность  $I_0$  естественного света на интенсивность  $I_1$  света, прошедшего через первый николю

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2I_0}{I_0(1-k)} = \frac{2}{1-k}. \quad (1)$$

Произведем вычисления

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{2}{1-0,05} = 2,1.$$

Таким образом, интенсивность света после прохождения через первый николю уменьшается в 2,1 раза.

2) Плоскополяризованный пучок света интенсивностью  $I_1$  падает на второй николю  $N_2$  и также расщепляется на два пучка различной интенсивности: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный пучок полностью поглощается зачерненной поверхностью призмы. Интенсивность  $I_2$  необыкновенного пучка, вышедшего из призмы  $N_2$ , определяется законом Малюса (без учета поглощения и отражения света во втором николе)

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между плоскостью колебаний в поляризованном пучке и плоскостью пропускания николя  $N_2$ .

Учитывая потери интенсивности на поглощение и отражение во втором николе, получаем

$$I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha.$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя найдем, разделив интенсивность  $I_0$  естественного света на интенсивность  $I_2$  света, прошедшего систему из двух николей,

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha}.$$

Заменяя отношение  $I_0/I_1$  соотношением (1), получаем

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1-k)^2 \cos^2 \alpha} = \frac{2}{(1-0,05)^2 \cos^2 60^\circ} = 8,86.$$

Таким образом, после прохождения света через два николя интенсивность его уменьшится в 8,86 раза.

**Ответ:** 1)  $I_0/I_1 = 2,1$ ; 2)  $I_0/I_2 = 8,86$ .

**Пример 7.** Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела,  $\lambda_m = 0,58$  мкм. Определить энергетическую светимость  $R_e$  поверхности тела.

**Решение:** Энергетическая светимость  $R_e$  абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры и выражается формулой

$$R_e = \sigma T^4, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$T$  – термодинамическая температура.

Температуру  $T$  можно вычислить с помощью закона смещения Вина

$$\lambda_m = b / T, \quad (2)$$

где  $b$  – постоянная закона смещения Вина.

Используя формулы (1) и (2), получаем

$$R_e = \sigma (b / \lambda_m)^4. \quad (3)$$

Произведем вычисления

$$R_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{2,90 \cdot 10^{-3}}{5,8 \cdot 10^{-7}} \right)^4 = 3,54 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2 = 35,4 \text{ МВт/м}^2$$

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

**Пример 8.** Красная граница фотоэффекта для никеля  $\lambda_k = 257$  мкм. Найти длину волны света, падающего на никелевый электрод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов 1,5 В.

**Решение:** Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$hc / \lambda = A + E_k, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны света;

$A$  – работа выхода электронов из металла;

$E_k$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Красная граница фотоэффекта определяется из условия равенства энергии фотона работе выхода электронов

$$hc / \lambda_k = A, \quad (2)$$

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

$$E_k = eU, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$U$  – задерживающая разность потенциалов.

Подставляя выражения (2) и (3) в (1), получаем

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_k} + eU. \quad (4)$$

Из уравнения (4) найдем длину волны света:

$$\lambda = \left( \frac{1}{\lambda_k} + \frac{eU}{hc} \right)^{-1};$$

$$\lambda = \left( \frac{1}{0,257 \cdot 10^{-6}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \right)^{-1} = 1,96 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,196 \text{ мкм}$$

**Ответ:**  $\lambda = 0,196$  мкм.

**Пример 9.** Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра  ${}^{16}_8\text{O}$ .

**Решение:** Дефект массы

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \quad (1)$$

где  $Z$  – зарядовое число;

$A$  – массовое число;

$m_p$  – масса протона;

$m_n$  – масса нейтрона;

$m_{\text{я}}$  – масса ядра.

Формулу (1) можно также записать в виде

$$\Delta m = Zm_{{}_1^1\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a, \quad (2)$$

где  $m_{{}_1^1\text{H}}$  – масса атома  ${}^1_1\text{H}$ ;

$m_a$  – масса атома, дефект массы ядра которого определяется.

Из справочных таблиц находим, что  $m_{{}_1^1\text{H}} = 1,00783$  а.е.м.;  $m_n = 1,00867$  а.е.м.;  $m_{{}_8^{16}\text{O}} = 15,9949$  а.е.м. Подставляя в (2) числовые данные (для  ${}^{16}_8\text{O}$  числа  $Z = 8$ ,  $A = 16$ ), получаем  $\Delta m = 0,13708$  а.е.м. Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме. Если дефект массы  $\Delta m$  выразить в а.е.м., а энергию связи  $E_{\text{св}}$  в МэВ, то формула (3) примет вид

$$E_{\text{св}} = 931 \Delta m ;$$

$$E_{\text{св}} = 931 \text{ МэВ/а.е.м.} \cdot 0,13708 \text{ а.е.м.} = 127,6 \text{ МэВ.}$$

Удельная энергия связи

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} ; \quad \varepsilon_{\text{св}} = \frac{127,6 \text{ МэВ}}{16} = 7,98 \text{ МэВ} .$$

**Ответ:**  $\Delta m = 0,13708$  а.е.м.,  $E_{\text{св}} = 127,6$  МэВ.,  $\varepsilon_{\text{св}} = 7,98$  МэВ .

**Пример 10.** Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного препарата магния  $^{27}\text{Mg}$  массой  $m = 0,2$  мкг, а также его активность  $A$  через время  $t = 6$  ч. Период полураспада магния  $T_{1/2} = 10$  мин.

**Решение:** Активность  $A$  изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа  $dN$  ядер, распавшихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$A = -\frac{dN}{dt} . \quad (1)$$

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

Для того, чтобы найти  $\frac{dN}{dt}$ , воспользуемся законом радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} , \quad (2)$$

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

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

$\lambda$  – постоянная радиоактивного распада.

Продифференцируем выражение (2) по времени:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} . \quad (3)$$

Исключив из формул (1) и (3)  $\frac{dN}{dt}$ , находим активность препарата в момент времени  $t$ :

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} . \quad (4)$$

Начальную активность  $A_0$  препарата получим при  $t = 0$ :

$$A_0 = \lambda N_0 \quad (5)$$

Постоянная радиоактивного распада  $\lambda$  связана с периодом полураспада  $T_{1/2}$  соотношением

$$\lambda = (\ln 2) / T_{1/2} \quad (6)$$

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

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \quad (7)$$

где  $m$  – масса изотопа;

$M$  – молярная масса.

С учетом выражений (6) и (7) формулы (5) и (4) принимают вид:

$$A_0 = \frac{m}{M} \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A; \quad (8)$$

$$A = \frac{m}{M} \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N_A \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad (9)$$

Произведем вычисления, учитывая, что  $T_{1/2} = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$ ,  $\ln 2 = 0,693$ ,  
 $t = 6 \text{ ч} = 6 \cdot 3,6 \cdot 10^3 \text{ с} = 2,16 \cdot 10^4 \text{ с}$ :

$$A_0 = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,693}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Бк} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = 5,13 \text{ ТБк};$$

$$A = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,693}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot e^{-\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4} \text{ Бк} = 81,3 \text{ Бк}$$

**Ответ:**  $A_0 = 5,13 \text{ ТБк}$ ,  $A = 81,3 \text{ Бк}$ .

**Пример 11.** КПД двигателя атомного ледокола равен 17%, его мощность  $P_1 = 3,2 \cdot 10^4 \text{ кВт}$ . Сколько урана – 235 расходует атомный реактор в сутки? При делении одного ядра атома урана выделяется энергия  $E_0 = 200 \text{ МэВ}$ .

**Решение:** Энергия, выделяющаяся при делении массы  $m$  урана за время  $t$ :

$$E = E_0 N,$$

где  $N$  – число атомов, содержащихся в этом количестве урана.

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

где  $M$  – молярная масса урана;

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

Тогда

$$E = E_0 \frac{m}{M} N_A.$$

КПД двигателя:

$$\eta = \frac{P_1 t}{E} = \frac{P_1 t M}{E_0 m N_A}.$$

Расход атомным реактором урана в сутки:

$$m = \frac{P_1 t M}{\eta E_0 N_A}.$$

Подставив в последнюю формулу числовые значения, выраженные в СИ и, произведя вычисления, получим:

$$m = \frac{3,2 \cdot 10^7 \cdot 86400 \cdot 235 \cdot 10^{-3}}{0,17 \cdot 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \approx 0,2 \text{ кг}.$$

**Ответ:**  $m = 0,2$  кг.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

501. На поверхность стеклянного объектива ( $n = 1,5$ ) нанесена тонкая пленка, показатель преломления которой  $n = 1,2$  («просветляющая» пленка). При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света с длиной волны 550 нм?

502. На стеклянную пластину ( $n = 1,5$ ) нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления  $n = 1,3$ . Пластинка освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 640$  нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину  $d_{min}$  должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость?

503. На тонкую глицериновую пленку толщиной  $d = 1,5$  мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить длины волн  $\lambda$  лучей видимого участка спектра ( $0,4 \leq \lambda \leq 7,6$  мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции.

504. На мыльную пленку ( $n = 1,33$ ) падает белый свет под углом  $45^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет ( $\lambda = 600$  нм)?

505. На стеклянную пластину положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Найти радиус  $R$  линзы, если радиус четвертого, темного кольца Ньютона в отраженном свете  $r_4 = 2$  мм.

506. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 500$  нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить минимальную толщину  $d_{min}$  пленки, если показатель преломления материала пленки  $n = 1,4$ .

507. Между пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус  $r_3$  третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм равен  $0,82$  мм. Радиус кривизны линзы  $R = 0,5$  м.

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

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

510. Плосковыпуклая стеклянная линза с оптической силой в одну диоптрию лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в проходящем свете  $r_5 = 1,1$  мм. Определить длину световой волны  $\lambda$ .

511. На дифракционную решетку, содержащую  $n = 400$  штрихов на  $1$  мм, падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол  $\varphi$  дифракции, соответствующий последнему максимуму.

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

513. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Чему должна быть равна постоянная дифракционной решетки, чтобы в направлении  $\varphi = 41^\circ$  совпадали максимумы двух линий:  $\lambda_1 = 653,3$  нм и  $\lambda_2 = 410,2$  нм?

514. На дифракционную решетку нормально падает пучок света. Красная линия ( $\lambda = 630$  нм) видна в спектре третьего порядка под углом  $\varphi = 60^\circ$ . 1) Какая спектральная линия видна под этим

же углом в спектре четвертого порядка? 2) Какое число штрихов на 1 мм длины имеет дифракционная решетка?

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

516. На дифракционную решетку, содержащую  $n = 100$  штрихов на 1 мм, нормально падает монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум второго порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол  $\Delta\varphi = 16^\circ$ . Определить длину волны  $\lambda$  света, падающего на решетку.

517. Постоянная дифракционной решетки в  $n = 4$  раза больше длины световой волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность. Определить угол  $\alpha$  между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

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

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

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

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

522. Пучок света последовательно проходит через два николя, плоскости пропускания которых образуют между собой угол  $\varphi = 40^\circ$ . Принимая, что потери интенсивности света на отражение и поглощение в каждом николе составляют 15%, найти во сколько раз пучок света, выходящий из второго николя, ослаблен по сравнению с пучком, падающим на первый николь.

523. Угол падения  $i$  луча на поверхность стекла равен  $60^\circ$ . При этом отраженный пучок света оказывается максимально поляризованным. Определить угол  $r$  преломления луча.

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

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

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

527. Угол преломления луча в жидкости  $r = 35^\circ$ . Определить показатель преломления  $n$  жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован.

528. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, поставленные так, что угол между их главными плоскостями равен  $\alpha$ . Как поляризатор, так и анализатор поглощают и отражают 8% падающего на них света. Оказалось, что интенсивность луча, вышедшего из анализатора, равна 9% интенсивности естественного света, падающего на поляризатор. Найти угол  $\alpha$ .

529. Угол Брюстера  $i_b$  при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен  $57^\circ$ . Определить скорость света в этом кристалле.

530. Луч света проходит через жидкость, налитую в стеклянный ( $n = 1,5$ ) сосуд, и отражается от дна. Отраженный луч полностью поляризован при попадании его на дно сосуда под углом  $42^\circ 37'$ . Найти показатель преломления жидкости.

531. Абсолютно черное тело имеет температуру  $T_1 = 500$  К. Какова будет температура  $T_2$  тела, если в результате нагревания поток излучения увеличится в  $n = 5$  раз?

532. Определить температуру  $T$  и энергетическую светимость  $R_e$  абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_m = 600$  нм.

533. Из смотрового окошечка печи излучается поток  $\Phi_e = 4$  кДж/мин. Определить температуру  $T$  печи, если площадь окошечка  $S = 8$  см<sup>2</sup>.

534. Поток излучения абсолютно черного тела  $\Phi_e = 10$  кВт. Максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda_m = 0,8$  мкм. Определить площадь  $S$  излучающей поверхности.

535. Как и во сколько раз изменится поток излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения переместится с красной границы видимого спектра ( $\lambda_{m1} = 760$  нм) на фиолетовую ( $\lambda_{m2} = 390$  нм)?

536. Муфельная печь, потребляющая мощность  $P = 1$  кВт, имеет отверстие площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Определить долю  $\eta$  мощности, рассеиваемой стенки печи, если температура ее внутренней поверхности равна 1 кК.

537. Средняя энергетическая светимость  $R$  поверхности Земли равна  $0,54 \text{ Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ . Какова температура  $T$  поверхности Земли, если условно считать, что она излучает как серое тело с коэффициентом черноты  $a_T = 0,25$ ?

538. Вычислить энергию, излучаемую за время  $t = 1$  мин с площади  $S = 1 \text{ см}^2$  абсолютно черного тела, температура которого  $T = 1000 \text{ К}$ .

539. В каких областях спектра лежат длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если источником света служит: 1) спираль электрической лампочки ( $T = 3000 \text{ К}$ ); 2) поверхность Солнца ( $T = 6000 \text{ К}$ ); 3) атомная бомба, в которой в момент взрыва развивается температура около  $10$  млн. градусов. Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

540. Мощность излучения абсолютно черного тела равна  $34 \text{ кВт}$ . Найти температуру этого тела, если известно, что поверхность его равна  $0,6 \text{ м}^2$ .

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

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

543. На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны  $\lambda = 200 \text{ нм}$ . Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов  $U_{3 \text{ min}}$ , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

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

545. На металлическую пластину направлен пучок ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 0,25 \text{ мкм}$ ). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов  $U_{3 \text{ min}} = 0,96 \text{ В}$ . Определить работу выхода  $A$  электронов из металла.

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

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

548. На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U_3 = 1,5$  В. Определить длину волны  $\lambda$  света, падающего на пластину.

549. На пластину падает монохроматический свет ( $\lambda = 0,42$  мкм). Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов  $U_3 = 0,95$  В. Определить работу  $A$  выхода электронов с поверхности пластины.

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

551. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома  ${}^7_3\text{Li}$ .

552. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ .

553. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома трития  ${}^3_1\text{H}$ .

554. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома бериллия  ${}^9_4\text{Be}$ .

555. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома азота  ${}^{14}_7\text{N}$ .

556. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ .

557. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома бора  ${}^{10}_5\text{B}$ .

558. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома углерода  ${}^{14}_6\text{C}$ .

559. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома углерода  ${}^{13}_6\text{C}$ .

560. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома кислорода  ${}^{17}_8\text{O}$ .

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

562. Определить какая часть исходных радиоактивных ядер распадается за время равное трем периодам полураспада.

563. Определить число  $N$  ядер, распадающихся в течение времени  $t = 1$  мин, в радиоактивном образце, содержащем изотопы кальция  ${}^{45}_{20}\text{Ca}$ , массой  $m = 1$  мг.

564. Какая часть первоначального количества выпавших в результате аварии на ЧАЭС в апреле 1986 г. радионуклидов  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$  и  ${}^{239}\text{Pu}$  распалась за прошедшее после аварии время?

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

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

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

568. Определить массу  $m$  изотопа  $^{131}_{53}I$ , имеющего активность  $A = 3 \cdot 10^9$  Бк.

569. Определить промежуток времени, в течение которого активность изотопа  $^{90}Sr$  уменьшится в 10 раз.

570. Какова масса изотопа  $^{293}_{94}Pu$ , активность которого равна  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк?

571. В одном акте деления  $^{235}_{92}U$  освобождается энергия 200 МэВ. Определить: 1) энергию, выделяющуюся при распаде всех ядер этого изотопа урана массой  $m = 1$  кг; 2) массу каменного угля с удельной теплотой сгорания  $q = 29,3$  МДж/кг, эквивалентную в тепловом отношении 1 кг урана  $^{235}_{92}U$ .

572. Мощность  $P$  двигателя атомного судна составляет 15 МВт; его к.п.д. равен 30%. Определить месячный расход ядерного горючего при работе этого двигателя. За каждый акт деления  $^{235}_{92}U$  выделяется энергия 200 МэВ.

573. Считая, что в одном акте деления ядра урана  $^{235}_{92}U$  освобождается энергия 200 МэВ, определить массу  $m$  этого изотопа, подвергшегося делению при взрыве атомной бомбы с тротильным эквивалентом  $30 \cdot 10^6$  кг, если тепловой эквивалент тротила равен 4,19 МДж/кг.

574. Какое количество энергии освободится, если разделятся все ядра урана  $^{235}_{92}U$ , содержащиеся в 1 г? При делении одного ядра освобождается энергия 200 МэВ.

575. Сколько ядер  $^{235}_{92}U$  должно делиться за 1 секунду, чтобы тепловая мощность ядерного реактора была равна 1 Вт? Считать, что при каждом распаде выделяется энергия 200 МэВ.

576. Тепловая мощность ядерного реактора 10000 кВт. Какое количество  $^{235}_{92}U$  будет израсходовано реактором за сутки? При каждом распаде выделяется энергия 200 МэВ.

577. Атомная электростанция мощностью 500 МВт имеет к.п.д. 20%. Определить годовой расход ядерного горючего, если в каждом акте деления  $^{235}_{92}U$  выделяется 200 МэВ энергии.

578. Найти электрическую мощность атомной электростанции, расходующей  $0,1 \text{ кг } {}^{235}_{92}\text{U}$  в сутки, если к.п.д. станции равен 16%. В каждом акте деления  ${}^{235}_{92}\text{U}$  выделяется 200 МэВ энергии.

579. Сколько  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  производит реактор мощностью 100 МВт в течение месяца, если принять, что в среднем в одном акте деления ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$  возникает 1,5 ядра плутония и выделяется 200 МэВ энергии.

580. Вычислить к.п.д. двигателей атомного ледокола, если мощность их  $P_1 = 3,2 \cdot 10^4 \text{ кВт}$ , а атомный реактор расходует  $m = 200 \text{ г}$  урана-235 в сутки. Вследствие деления одного ядра атома выделяется энергия  $E_0 = 200 \text{ МэВ}$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

### Работа выхода электронов

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

Таблица П2

### Массы нейтральных атомов (а.е.м.)

Элемент	Изотоп	Масса	Элемент	Изотоп	Масса
Нейтрон	${}^1_0n$	1,00867	Бериллий	${}^9_4Be$	9,01219
Водород	${}^1_1H$	1,00783	Бор	${}^{10}_5B$	10,01294
	${}^2_1H$	2,01410	Углерод	${}^{12}_6C$	12,00000
	${}^3_1H$	3,01605		${}^{13}_6C$	13,00335
Гелий	${}^3_2He$	3,01603		${}^{14}_6C$	14,00324
	${}^4_2He$	4,00260	Азот	${}^{14}_7N$	14,00307
Литий	${}^6_3Li$	6,01513	Кислород	${}^{16}_8O$	15,99491
	${}^7_3Li$	7,01601		${}^{17}_8O$	16,99913

Таблица П3

### Периоды полураспада некоторых радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада
Кальций	${}^{45}_{20}Ca$	164 сут.
Йод	${}^{131}_{53}I$	8,05 дня
Стронций	${}^{90}_{38}Sr$	29,1 года
Цезий	${}^{137}_{55}Cs$	30 лет
Плутоний	${}^{239}_{94}Pu$	24 390 лет

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 3 т. / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1977–1989. – Т. 1–3.
2. Детлаф, А.А. Курс физики: в 3 т. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 1973–1979. – Т. 1–3.
3. Наркевич, И.И. Физика для вузов: в 3 т. / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. – Минск: Вышэйшая школа, 1992–1994. – Т.1–2.
4. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1985–1990.
5. Зисман, Г.А. Курс общей физики: в 3 т. / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М.: Наука, 1972–1974. – т. 1–3; - Киев: Дніпро, 1994, т. 1–3.
6. Чертов, А.Г. Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – М.: Высшая школа, 1981–1988.
7. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука, 1973–1990; СПб: Спец. лит., Лань, 1999.
8. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1994–1996.
1. Берклеевский курс физики: в 5 т. / Ч. Киттель [и др.] – М.: Наука, 1971–1974. – Т.1–5.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: в 5 т. / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977–1990. – Т. 1–5.
3. Матвеев, А.Н. Курс общей физики / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1976–1989.
4. Савельев, И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982.