ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра физики

**Выполнение контрольных заданий по дисциплинам «Физические основы пищевых технологий», «Физические основы технологии производства, хранения, транспортировки и оценки качества товаров», «Специальные разделы физики»**

Методические указания

для студентов заочного отделения

Кемерово 2014

*Составители:*

**Н.М. Волкова**, доцент, канд. техн. наук;

**О.С. Оболонская**, ст.преподаватель, канд. физ.-мат. наук;

**О.Т.Сташкова**, ст.преподаватель;

**Н.Б. Шубина**, ст.преподаватель;

*Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры физики*

*Протокол № 3 от 14 ноября 2013 г.*

*Рассмотрено методической комиссией технологического факультета*

*Протокол\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

Представлены рекомендации для изучения дисциплин «Физические основы пищевых технологий», «Физические основы технологии производства, хранения, транспортировки и оценки качества товаров», «Специальные разделы физики», контрольные задания, варианты контрольных работ, примеры выполнения контрольной работы, рекомендуемая литература.

Данные методические указания предназначены для студентов заочного отделения.

***ПРЕДИСЛОВИЕ***

Целью настоящего учебно-методического пособия – оказать помощь студентам – заочникам инженерно-технических и технологических специальностей пищевого профиля в изучении специальных разделов физики.

Пособие предназначено для освоения таких дисциплин:

-физические основы пищевых технологий;

-физические основы технологии, производства, хранения, транспортировки и оценки качества товаров;

-специальные разделы физики.

Учебный материал в пособии разделен на шесть разделов, в каждом из которых даны основные формулы, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения. В конце пособия приведены некоторые справочные данные, необходимые для решения задач.

Номера задач для самостоятельного решения в каждом разделе выбираются по последней цифре зачетной книжки студента. Например, последняя цифра в зачетной книжке -4 , значит нужно решать задачи 1.4; 2.4; 3.4; 4.4; 5.4; 6.4.

**I Тепловое излучение.**

1. **Закон Кирхгофа.**

$\frac{r(ω,T)}{a(ω,T)}=f(ω,T)$,

где $r(ω,T)$ - спектральная излучательная способность тела,

 $a(ω,T)$ - спектральная поглощательная способность тела,

 $f(ω,T)$ – универсальная функция Кирхгофа.

*Отношение спектральной излучательной способности тела к его спектральной поглощательной способности для всех тел одинаково и зависит только от частоты и температуры.*

1. **Закон смешения Вина**

,

где  - длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения;

  - постоянная закона смещения Вина (=2,90·10-3 м·К).

*Длина волны, соответствующая максимальной спектральной излучательной способности тела, обратно пропорциональна термодинамической температуре тела.*

1. **Закон Стефана – Больцмана**

$R^{\*}=σT^{4}$,

где $R\_{}^{\*}$ - энергетическая светимость абсолютно черного тела;

  - термодинамическая температура;

  - постоянная Стефана – Больцмана (=5,67·10-8 Вт/м2·К4).

*Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна термодинамической температуре тела в четвертой степени.*

Энергетическая светимость серого тела

$R=kσT^{4}$,

где $k$ - коэффициент серости (коэффициент излучения) тела.

**Примеры решения задач.**

*Пример 1.* Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела, *λm*=0,58 мкм. Определить энергетическую светимость R поверхности тела.

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

 $R^{\*}=σT^{4}$, (1)

где σ — постоянная Стефана — Больцмана;

Т - термодинамическая температура.

Температуру *Т* можно вычислить с помощью закона смещения Вина:

 $λ\_{m}={b}/{T}$, (2)

где *b* — постоянная закона смещения Вина.

Используя формулы (2) и (1), получаем

 $R=σ\left({b}/{λ\_{m}}\right)^{4}$, (3)

Произведем вычисления:

$R=5,67∙10^{-8}\left(\frac{2,90∙10^{-3}}{5,8∙10^{-7}}\right)^{4} Вт/м^{2}=3,54∙10^{7}Вт/м^{2}=35,4$ МВт/м2.

*Пример 2.* Какова должна быть температура источника света, чтобы максимум энергии излучения приходился на рентгеновское излучение с длиной волны 30 нм?

Р е ш е н и е: На основании закона Вина $T=\frac{b}{λ\_{max}}; T=\frac{2,898∙10^{-3}м∙К}{3∙10^{-8}м}=0,966∙10^{5} К=96600 К$

*Пример 3.*Во сколько раз энергетическая светимость голубой звезды спектрального класса О, температура атмос­феры которой 30000 К, больше энергетической све­тимости желтой звезды спектрального класса G, температура атмосферы которой 6000 К?

Р е ш е н и е: На основании закона Стефана-Больцмана выразим энергетические светимости каждой звезды: $R\_{1}=σT\_{1}^{4}; R\_{2}=σT\_{2}^{4}$. Тогда ${R\_{1}}/{R\_{2}}=\left({T\_{1}}/{T\_{2}}\right)^{4}, {R\_{1}}/{R\_{2}}=\left({30000}/{6000}\right)^{4}=5^{4}=625$

*Пример 4.*Определить энергию, излучаемую желтой звездой спектрального класса *G* (например, Солнцем) с повер­хности 1 м2 за 1 с, если температура ее поверхности T=6000 К.

Р е ш е н и е: Энергия излучения $W=RSt; W=σT^{4}St;$

$$W=5,67∙10^{-8} {Вт}/{\left(м^{2}∙К^{4}\right)}∙6^{4}∙10^{12}К^{4}∙1м^{2}∙1с=73,48 МДж$$

*Пример 5.*Чугунная деталь массой 50 кг нагрета до температуры 600 К, а стальная деталь массой 5 кг нагрета до температуры 800 К. Какая деталь обладает большей энергетической светимостью и во сколько раз?

Решение: На основании закона Стефана-Больцмана энергетическая светимость черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры и не зависит ни от массы тела, ни от рода вещества, поэтому энергетическая светимость стальной детали будет больше, чем чугунной, так как ее температура больше. Определим, во сколько раз энергетическая светимость стальной детали больше, чем чугунной:

$R\_{1}=σT\_{1}^{4}; R\_{2}=σT\_{2}^{4}$, тогда ${R\_{2}}/{R\_{1}}=\left({T\_{2}}/{T\_{1}}\right)^{4}, $

 ${R\_{2}}/{R\_{1}}=\left({800}/{600}\right)^{4}=\left(\frac{4}{3}\right)^{4}=\frac{256}{81}=3,16.$

**Задачи для самостоятельного решения.**

**1.1** На какую длину волны приходится максимум энергии излучения, если температура абсолютно черного тела равна 500 К?

*[*=5,8·10-6 м*]*

**1.2.** Начальная температура тела 150оС. Определить, на сколько нужно повысить температуру абсолютно черного тела, чтобы мощность суммарного излучения увеличилась в 5 раз.

*[*=207,27 К*]*

**1.3.** Максимум энергии излучения абсолютно черного тела приходится на длину волны 450 нм. Определить температуру и энергетическую светимость тела.

*[*=6,42·103 К; =9,5·107 Вт/м2*]*

**1.4.** Абсолютно черное тело было нагрето от температуры 100 до 300оС. Найти, во сколько раз изменилась мощность суммарного излучения при этом.

*[*5,56*]*

**1.5.** Температура абсолютно черного тела понизилась с 1000 до 850 К. Определить, как и во сколько раз при этом изменилась длина волны, отвечающая максимуму распределения энергии.

*[*Возросла в 1,176 раз*]*

**1.6.** Имеется два абсолютно черных источника теплового излучения. Температура одного из них *T1* = 2500 К. Найти температуру другого источника, если длина волны, отвечающая максимуму его испускательной способности, на *Δλ* = 0,50 мкм больше длины волны, соответствующей максимуму испускательной способности первого источника.

*[*Т=1,75кК*]*

**1.7.** Энергетическая светимость абсолютно черного тела R\*= 3,0 Вт/см2. Определить длину волны, отвечающую максимуму испускательной способности этого тела.

*[*λ= 3,4 10-6∙м*]*

**1.8.** При увеличении термодинамической температуры *Т* черного тела в *n*=2 раза длина волны *λmax*, на которую приходится максимум спектральной излучательной способности уменьшилась на *Δλ*=400нм. Определить начальную и конечную температуры *T1* и *T2*.

*[T1*=3,25·103 К; *T2*=6,5·103 К*]*

**1.9.** Найти температуру *T* печи, если известно, что излучение из отверстия площадью *S* = 6,1 см2 имеет мощность *N* = 34,6 Вт. Излучение считать близким к излучению абсолютно черного тела.

*[*1000 К*]*

**1.10.** Какую мощность *N* излучения имеет Солнце? Излучение Солнца считать близким к излучению абсолютно черного тела. Температура поверхности Солнца *T* = 5800 К.

*[N* =3,9∙1026 Вт*]*

**1.11.** Максимум спектральной излучательной способности абсолютно черного тела приходится на длину волны *λmax* = 2 мкм. На какую длину волны он сместится, если температура тела увеличилась на *∆Т* = 350 К.

*[*λ2= 1,6 мкм*]*

**II. Фотоэффект**

Формула Эйнштейна в общем случае

$hν=A+T\_{max}$, или ,

где  - энергия фотона, падающего на поверхность металла;

 *h* - постоянная Планка (*h*=6,62·10-34 Дж·с);

 *ћ=* $\frac{h}{2π}$*=*1,05∙10-34Дж∙с*;*

 *c* – скорость света в вакууме*;*

 *ν* – частота;

  - работа выхода электрона из металла;

$A=\overbar{e}·φ\_{вых}$;

 $\overbar{e}$ - заряд электрона ($\overbar{e}$ =1,6·10-19 Кл);

  *φ*вых - потенциал выхода электрона из металла;

  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

$T\_{max}=\frac{mυ^{2}}{2}$,

 *m* - масса электрона (*m* = 9,1·10-31 кг);

 *υ* – максимальная скорость электрона;

$T\_{max}=\overbar{e}∙U\_{зад}$,

где $U\_{зад}$ - задерживающее напряжение, при котором прекращается фототок.

В случае, если энергия фотона много больше работы выхода ($hν\gg A$),

, или .

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона в двух случаях (нерелятивистском и релятивистском) выражается различными формулами:

а) если фотоэффект вызван фотоном, имеющим незначительную энергию (<5 кэВ), то

,

где  - масса покоя электрона;

б) если фотоэффект вызван фотоном, обладающим большой энергией 5 кэВ, то

, или ,

где ;

  - масса релятивистского электрона.

При $\frac{mυ^{2}}{2}$=0 *hν0*=$\overbar{e}·φ\_{вых}$;

$ν\geq ν\_{0}=\frac{\overbar{e} φ\_{вых}}{h}$ - красная граница фотоэффекта по частоте *ν*.

$ω\geq ω\_{0}=\frac{2π\overbar{e }φ\_{вых}}{h}$ - красная граница фотоэффекта по циклической частоте *ω*.

$λ\leq λ\_{0}=\frac{2πс}{ω\_{0}}$ - красная граница фотоэффекта по длине волны.

Красная граница фотоэффекта:

, или ; , или ,

где  - максимальная длина волны излучений ( и  - минимальные соответственно частота и круговая частота), при которых еще возможен фотоэффект.

**Примеры решения задач.**

*Пример 1.*В явлении фотоэффекта электроны, вырываемые с поверхности металла излучением частотой 2·1015 Гц, полностью задерживаются тормозящим полем при разности потенциалов 7 В, а при частоте 4·1015 Гц — при разности потенциалов 15 В. По этим данным вычислить по­стоянную Планка.

Решение. Запишем уравнение Эйнштейна для двух рассмотренных в условии задачи случаев фотоэффекта:

 $hν\_{1}=A+{mν\_{1}^{2}}/{2}; hν\_{2}=A+{mν\_{2}^{2}}/{2}$ (1)

Так как вылетевшие с поверхности металла электроны полностью задерживаются тормозящим электрическим полем, то изменение их кинетической энергии равно работе электрического поля:

 ${mυ^{2}}/{2}=\overbar{e}U$.(2)

Учитывая выражение (2), перепишем (1) в виде

$$hν\_{1}=A+\overbar{e}U\_{1}, hν\_{2}=A+\overbar{e}U\_{2}$$

Решая совместно эту систему уравнений, находим

$$h=\frac{\overbar{e}\left(U\_{2}-U\_{1}\right)}{ν\_{2}-ν\_{1}};$$

$$h=\frac{1,6∙10^{-19}∙\left(15-7\right)}{4∙10^{15}-2∙10^{15}} Дж∙с=6,4∙10^{-34} Дж∙с.$$

*Пример 2.*Найти величину задерживающего напряжения для фотоэлектронов, испускаемых при освещении калия светом, длина волны которого 3300 Ǻ. Работа выхода электронов для калия A =2 эВ (1 Ǻ=10-10 м; 1эВ=1,6∙10-19 Дж).

Решение. По формуле Эйнштейна:

$hν=A+\frac{mυ^{2}}{2}$; $\frac{mυ^{2}}{2}=\overbar{e}∙U\_{зад}$;

$ν=\frac{с}{λ}$;

$h\frac{с}{λ}=A+\overbar{e}∙U\_{зад}$;

$U\_{зад}=\frac{h\frac{с}{λ}-A}{\overbar{e}}$;

$U\_{зад}=\frac{6,62∙10^{-34} \frac{3∙10^{8}}{3,3∙10^{-7}} - 2∙1,6∙10^{-19}}{1,6∙10^{-19}}=1,75 В$.

*Пример 3.*Кванты света с энергией *ε* = 4,9 эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода *A* = 4,5 эВ. Найти максимальный импульс, передаваемый поверхности металла при вылете каждого электрона.

$hν=A+\frac{mυ^{2}}{2}$;

$\frac{mυ^{2}}{2}= hν-A$;

$υ=\sqrt{\frac{2(4,9-4,5)∙1,6∙10^{-19}}{9,1∙10^{-31}}}=0,375∙10^{6}м/с$*.*

$p=mυ=9,1∙10^{-31}∙0,375∙10^{6}=3,41∙10^{-25}$ кг∙м/с.

**Задачи для самостоятельного решения.**

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

*[*=2,23 эВ*]*

**2.2.** На поверхность калия падает свет с длиной волны =150 нм. Определить максимальную кинетическую энергию  фотоэлектронов.

*[*=9,74·10-19 Дж*]*

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

*[*=5,33·10-27 кг/м*]*

**2.4.** На фотоэлемент с катодом из лития падает свет с длиной волны =200 нм. Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

*[*=40,1 В*]*

**2.5.** Какова должна быть длина волны -излучения, падающего на платиновую пластину, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была =3 Мм/с?

*[*=7,09·10-8 м*]*

**2.6.** На металлическую пластинку направлен пучок ультрафиолетового излучения (=0,25 мкм). Фототок прекращается при минимальной задерживающей разности потенциалов =0,96 В. Определить работу выхода  электронов из металла.

*[*=6,4·10-19 Дж*]*

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

*[*=0,66*]*

**2.8.** На металл падает рентгеновское излучение с длиной волны =1 нм. Пренебрегая работой выхода, определить максимальную скорость  фотоэлектронов.

*[*=2,08·107 м/с*]*

**2.9.** На металлическую пластину направлен монохроматический пучок света с частотой =7,3·1014 Гц. Красная граница  фотоэффекта для данного материала равна 560 нм. Определить максимальную скорость фотоэлектронов.

*[*=5,3·105 м/с*]*

**2.10.** На цинковую пластину направлен монохроматический пучок света. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов =1,5 В. Определить длину волны  света, падающего на пластину.

*[*=9,9310-7 м*]*

**III. Световое давление**

Давление, производимое светом при нормальном падении, рассчитывается по формуле:

$p=(1+R)ω$;

*R* – коэффициент отражения поверхности (*R*=1 для зеркальной поверхности, *R*=0 для зачерненной поверхности);

*ω* – объемная плотность энергии излучения.

$ω=\frac{W}{c}$,

$ W=nhν$ – энергия всех фотонов, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности;

*с* - скорость электромагнитного излучения в вакууме;

*n* - число падающих фотонов;

*h* - постоянная Планка;

*ν* – частота света.

**Примеры решения задач.**

*Пример 1.* Найти давление света на стенки колбы электри­ческой лампы мощностью *N* = 100 Вт. Колба лампы - сфера радиусом *r* = 5 см, стенки которой отражают 10% падающего на них света. Считать, что вся потребляемая лампой мощность идет на излучение.

Решение. Световое давление $p=(1+R)ω$, (1)

Поскольку $ω$ *=* $\frac{N}{S∙c}$*,* где *S = 4πr2* - площадь поверхности лампы, формулу (1) можно преобразовать:

$$p=\frac{N}{4πr^{2}c}\left(1+R\right);$$

$$p=\frac{10^{2}}{4∙3,14∙\left(5∙10^{-2}\right)^{2}∙3∙10^{8}}\left(1+0,1\right) Па=12мкПа.$$

*Пример 2.* Пучок света с длиной волны 0,49 мкм, падая пер­пендикулярно поверхности, производит на нее давление 5 мкПа. Сколько фотонов падает ежесекундно на 1 м2 этой поверхности? Коэффициент отражения света от данной поверхности 0,25.

Решение. Из формулы светового давления $p=(1+R)ω$ найдем энергию всех фотонов, падающих на 1 м2 поверхности за 1 с:

 $ω=\frac{nh}{λ}$ – объемная плотность энергии, переносимая фотонами в единицу времени на единицу площади.

 Тогда $p=(1+R)\frac{nh}{λ}$;

Следовательно, число фотонов, падающих ежесекундно на 1 м2 поверхности лампы, равно

$$n=\frac{pλ}{h\left(1+R\right)с};$$

$$n=\frac{5∙10^{-6}∙4,9∙10^{-7}}{6,62∙10^{-34}∙\left(1+0,25\right)∙3∙10^{8}}=0,987∙10^{13}.$$

*Пример 3.*На поверхность площадью 100 см2 ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Найти световое давление в случаях, когда поверхность полностью отражает и полностью поглощает все излучение.

Решение**.** 1. Так как *R = 1*, то световое давление *р = 2ω.*

Но, согласно определению, *ω* = *W/(Stc),* поэтому $p=\frac{2W}{cSt}; p=\frac{2∙63}{3∙10^{8}∙10^{-2}∙60}Па=0,7 мкПа.$

2. Так как *R = 0*, то *р = ω,* или $p=\frac{W}{cSt}; p=\frac{63}{3∙10^{8}∙10^{-2}∙60}Па=0,35 мкПа.$

*Пример 4.*Давление *p* света на поверхность, имеющую коэффициент отражения *R*= 0,25, составило 0,25 мкПа. Энергетическая освещенность этой поверхности (в $\frac{Bm}{м^{2}}$) равна…

Решение: Применяем формулу для давления света $p=\frac{E}{c}\left(1+R\right)$, где *E* – энергетическая освещенность поверхности, то есть энергия, падающая на единицу площади поверхности за единицу времени; с - скорость света; *R* – коэффициент отражения. Отсюда энергетическая освещенность поверхности

$E=\frac{p∙c}{1+R}=\frac{0,25∙10^{-6}∙3∙10^{8}}{1,25}=60 \frac{Bm}{м^{2}}$.

**Задачи для самостоятельного решения.**

**3.1.** На поверхность площадью =0,01 м2 в единицу времени падает световая энергия =1,05 Дж/с. Найти световое давление  в случаях, когда поверхность полностью отражает и полностью поглощает падающие на неё лучи.

*[*=0,7 мкПа; =0,35 мкПа*]*

**3.2.** Монохроматический пучок света (=490 нм), падая по нормали к поверхности, производит световое давление =4,9 мкПа. Какое число фотонов  падает в единицу времени на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света =0,25.

*[*=2,9·1021 с-1·м-2*]*

**3.3.** На зеркальную поверхность площадью 5 см2 по нормали к ней ежесекундно падает 5$∙$1017 фотонов. Если при этом световое давление равно 2 мкПа, то чему равна длина волны (в нм) падающего света?

*[λ =* 662 нм*]*

**3.4.** Пучок монохроматического света с длиной волны *λ*=663 нм падает нормально на зеркальную плоскую поверхность. Поток энергии *Ф* = 0,6 Вт. Определить силу *F* давления, испытываемую этой поверхностью, а также число *N* фотонов, падающих на нее за время *t*=1 с.

*[F =4* нН*, N* = 2∙1018 1/с*]*

**3.5.** На поверхность площадью *S* = 100 см2 ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Найти величину светового давления на: 1) зеркальную поверхность; 2) на черную поверхность.

*[*=7∙10-7 Па; =3,5∙10-7 Па*]*

**3.6.** Определить коэффициент отражения поверхности, если при энергетической освещенности *E*=120 Вт/м2 давление света на неё оказалось равным 0,5 мкПа.

*[R=0,25]*

**3.7.** Перпендикулярно поверхности площадью 4 м2 падает 7,74·1022 фотонов излучения с длиной волны *λ* = 0,64 мкм за 10 с. Определить световое давление на зеркальную поверхность, черную поверхность и поверхность с коэффициентом отражения 0,4.

*[*=2,56∙10-12 Па; =1,28∙10-12 Па; =1,79∙10-12 Па*]*

**3.8.** Давление *р* света с длиной волны *λ* = 40 нм, падающего нормально на черную поверхность, равно 2 нПа. Определить число *N* фотонов, падающих за время *t* = 10 с на площадь *S* = 1 мм2 этой поверхности.

*[N*=1,21·1012∙фотонов*]*

**3.9.** Свет длиной волны *λ* = 40 нм падает нормально на черную поверхность, число *N* фотонов, падающих на площадь *S* = 1 мм2 этой поверхности за время *t* = 10 с равно *N*=1,21·1012∙фотонов. Найти давление света *p*.

*[*2 нПа.*]*

**3.10.** Свет нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давление *р* = 4 мкПа. Число *N* фотонов, падающих за время *t* = 10 с на площадь *S* = 1 мм2 этой поверхности равно 1,81∙1016. Определить длину волны света.

*[*600 нм*]*

**3.11.** На зеркальную поверхность площадью *S* = 6 см2 падает нормально поток излучения *Ф* = 0,8 Вт. Определить давление *р* и силу давления *F* света на эту поверхность.

*[Р*=8,89 мкПа, *F*=5,53∙10-9 Н*]*

**IV. Волны де Бройля**

1.Формула де Бройля, выражающая связь длины волны с импульсом  движущейся частицы, для двух случаев:

а) в классическом приближении ($υ\ll c$; )

$λ=\frac{h}{p}$;

*λ* – длина волны де Бройля;

 *h* - постоянная Планка;

 $p=mυ$ – импульс микрочастицы.

Фазовая скорость волн де Бройля

$υ\_{фаз}=\frac{с^{2}}{υ}$;

 *c* – скорость света;

 $υ$ – скорость частицы.

Групповая скорость волн де Бройля

*U=c.*

б) в релятивистском случае (скорость  частицы сравнима со скоростью  света в вакууме; )

.

2. Связь длины волны де Бройля с кинетической энергией  частицы:

а) в классическом приближении ;

б) в релятивистском случае ,

где  - энергия покоя частицы ()

**Примеры решения задач.**

*Пример 1.* Электрон разогнали из состояния покоя в электрическом поле при напряжении *U* = 100 В. Чему равна длина волны де Бройля *λе* этого электрона?

Решение: Длина волны де Бройля электрона определяется равенством $λ\_{е}=\frac{h}{υm\_{e}}$, (1)

где *υ*— скорость электрона, разогнанного электрическим полем, сообщившим ему кинетическую энергию

 $E\_{к}=\frac{m\_{e}∙υ^{2}}{2}$. (2)

При этом электрическое поле совершило работу

 *А =* $\overbar{e}$*U.* (3)

Приравняв (2) и (3), найдем скорость электрона *υ*, необходимую нам для определения длины волны де Бройля:

$\frac{m\_{e}∙υ^{2}}{2}=\overbar{e}U$, откуда$υ=\sqrt{\frac{2\overbar{e}U}{m\_{e}}}$. (4)

Подставим (4) в (1):

$λ\_{e}=\frac{h}{m\_{e}\sqrt{\frac{2\overbar{e}U}{m\_{e}}}}$ или $λ\_{e}=\frac{h}{\sqrt{2m\_{e}\overbar{e}U}}$.

Произведем вычисления:

$λ\_{e}=\frac{6,62∙10^{-34}}{\sqrt{2∙9,1∙10^{-31}∙1,6∙10^{-19}∙100}} м=1,2∙10^{-10} м$.

*Пример 2.* Если протон и дейтрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов, то отношение их длин волн де Бройля равно…

Решение: Дейтрон - ядро тяжелого изотопа водорода (дейтерия). Длина волны де Бройля определяется по формуле $λ=\frac{h}{p}$, где р — импульс частицы. Импульс частицы можно выразить через ее кинетическую энергию: $E\_{к}=\frac{p^{2}}{2m} \rightarrow p=\sqrt{2mE\_{к}}$. По теореме о кинетической энергии, согласно которой работа сил электрического поля идет на приращение кинетической энергии, $qU\_{уск}=ΔE\_{к}$. Отсюда можно найти $E\_{к}$, полагая, что первоначально частица покоилась: $qU\_{уск}=E\_{к}$. Окончательное выражение для длины волны де Бройля через ускоряющую разность потенциалов имеет вид $λ=\frac{h}{p}=\frac{h}{\sqrt{2mE\_{k}}}=\frac{h}{\sqrt{2mqU\_{уск}}}$. Учитывая, что $m\_{d}≅2m\_{p}$ и $q\_{d}=q\_{p}$, отношение длин волн де Бройля протона и дейтрона равно: $\frac{λ\_{p}}{λ\_{d}}=\sqrt{\frac{m\_{d}q\_{d}}{m\_{p}q\_{p}}}=\sqrt{2}$.

*Пример 3.* Длина волны де Бройля составляет 2·10-12 м. Чему равен её импульс?

Решение: Длина волны де Бройля *λ* связана с её импульсом *p* формулой:

$λ=\frac{h}{p}$,

откуда $p=\frac{h}{λ}=\frac{6,6·10^{-34}}{2·10^{-12}}=3,3·10^{-22}кг·{м}/{с}$

**Задачи для самостоятельного решения.**

**4.1.** Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя (2). Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.

*[*8,6·10-13 м*]*

**4.2.** Протон обладает кинетической энергией 1кэВ. Определить дополнительную энергию, которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волны де Бройля уменьшилась в 3 раза.

*[*12,8⋅10-16 Дж=8 кэВ*]*

**4.3.** Определить длину волны де Бройля -частицы и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов 1 кВ.

*[*=9⋅10-13 м; =3,2⋅10-13 м*]*

**4.4.** Вычислить наиболее вероятную дебройлевскую длину волны молекул азота, содержащихся в воздухе при комнатной температуре.

*[*=3,3⋅10-11 м*]*

**4.5.** Кинетическая энергия протона равна его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого протона.

*[*7,65⋅10-16 м*]*

**4.6.** Определить длины волн де Бройля электрона и протона, прошедших ускоряющую разность потенциалов 400 В.

*[*=1,43⋅10-12 м; =6,14⋅10-11 м*]*

**4.7.** Кинетическая энергия электрона равна его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.

[1,4⋅10-12 м*]*

**4.8.** Масса движущегося электрона в 2 раза больше массы покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.

*[*1,4⋅10-12 м*]*

**4.9.** Сравнить длины волн электрона и протона, прошедших ускоряющую разность потенциалов 1000 В.

*[*=43(раза)*]*

**4.10.** Найти длину волны де Бройля  для электронов, прошедших разность потенциалов =1 В и =100 В.

*[*=1,23 нм; =0,123 нм*]*

**V Соотношение неопределенностей Гейзенберга.**

Микрочастица не может иметь одновременно определенную координату (*x,y,z*) и определенную соответствующую проекцию импульса (*px, py, pz*). Неопределенности этих величин удовлетворяют условию:

$\left\{\begin{array}{c}∆x·∆p\_{x}\geq ћ\\∆y·∆p\_{y}\geq ћ\\∆z·∆p\_{z}\geq ћ\end{array}\right.$,

где =$\frac{h}{2π}$ = 1,05·10-34 Дж·с – постоянная Планка.

В квантовой теории рассматриваются также неопределенности для энергии микрочастицы (*E*) и времени (*t*) нахождения частицы в данном энергетическом состоянии.

$$∆E·∆t\geq ћ$$

*Пример 1.* Среднее время жизни π+ -мезона равно 2,5∙10-8 c. Какова должна быть энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать π+ -мезон?

Дано: *∆t*= 2,5∙10-8 c, $ћ$ = 1,05∙10-34 Дж∙с

Найти: *∆Е*

Решение: Из неопределенности Гейзенберга *ΔЕΔt*$ \geq ћ$следует, что

*∆Е ≥ ℏ / ∆t*

*ΔЕ* =$\frac{1,05∙10^{-34}}{2,5∙10^{-8}}$ =4,2∙10-27 Дж

*Пример 2.* Неопределенность в определении местоположения частицы, движущейся вдоль оси *x*, равна длине волны де Бройля для этой частицы. Определить неопределенность ее скорости

Решение:Из соотношения неопределенностей Гейзенберга для координаты и соответствующей компоненты импульса *Δx∙Δpx≥ћ* следует, что *Δx∙m∙*$Δυ\_{x} \geq $ *ћ*.

Здесь – *Δx* - неопределенность координаты, *Δpx* – неопределенность проекции импульса, *Δυx* – неопределенность *x*-компоненты скорости, *m* – масса частицы; *ћ* – постоянная Планка, деленная на 2π. По условию ,

*Δx* =$λ$ ,

где λ – длина волны де Бройля, определяемая соотношением

*λ =*$h/p =h/(m∙υ\_{x} )$*.*

$$∆p\_{x}=m∆υ\_{x}$$

*Δx∙Δpx≥ћ*

*λ ∙*$ m∆υ\_{x}$*≥ ћ*

$∆υ\_{x}$*=* $\frac{ћ}{λ·m}$*.*

*Пример 3.* Масса движущегося электрона в три раза больше массы его покоя. Чему равна минимальная неопределенности координаты электрона?

Дано: *m* = 3*m0*; *m0*= 0,91∙10-30 кг

Найти: *Δхmin*

Решение: согласно соотношениям неопределенности Гейзенберга

∆*x∆p ≥ ћ*,

где *∆x* и *∆p* - неопределенности координаты и импульса частицы; *h* - постоянная Планка.

Учитывая, что импульс равен *p=mυ* ,

где *m* - масса, a *υ*- скорость частицы, можно записать

*∆x≥*$\frac{ћ}{m∆υ\_{x}}$

Такая неопределенность скорости *∆υx* , как и сама скорость не может превышать скорости света в вакууме, поэтому *∆xmin =*$\frac{ћ}{mc}$. По условию задачи *m =3m0*, тогда

*∆xmin =*$ \frac{ћ}{3m\_{0}c}$ *=* 6,62·10-34 Дж с / (6·3,14∙0,91∙10-30кг· 3∙108 м/с) = 1,28 ∙ 10-13 м

*Пример 4.* Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка *T*=10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

Решение: соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид

∆*x∆p ≥ ћ*,

Пусть атом имеет линейные размеры *l*, тогда электрон атома будет находится где-то в пределах области с неопределенностью

*Δx=* $\frac{l}{2}$.

Тогда соотношение неопределенности можно записать в виде:

$\frac{l}{2}$ *∆p ≥ ћ*,

откуда *l ≥2ћ/∆p*,

Физически разумная неопределенность импульса *∆p*, во всяком случае, не должна превышать значения самого импульса *p*, то есть *∆p*$\leq $*p.* Импульс *p* связан с кинетической энергией *T* соотношением $p=\sqrt{2mT}$. Заменим *∆p* значением $\sqrt{2mT}$ (такая замена не увеличит *l*). Переходя от неравенства к равенству, получим:

$l\_{min}=\frac{2ћ}{\sqrt{2mT}}$.

Произведем вычисления:

$l\_{min}=\frac{2·1,05·10^{-34}}{\sqrt{2·9,1·10^{-31}·1,6·10^{-19}·10}}=1,24·10^{-10} м=124 нм$.

**Задачи для самостоятельного решения.**

**5.1.** Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии (10-3 c). Учитывая, что постоянная Планка *ћ*=6,6·10-16эВ·с, определить ширину метастабильного уровня (в эВ).

*[*$∆E=6,6 ·10^{-13} эВ$*]*

**5.2.** Время жизни атома в возбужденном состоянии *Δt*=10 нс. Учитывая, что постоянная Планка *ћ*=6,6·10-16эВ·с, определить ширину энергетического уровня (в эВ)?

*[*$∆E=6,6 ·10^{-8} эВ$*]*

**5.3.** Положение атома углерода в кристаллической решетке алмаза определено с погрешностью м. Учитывая, что постоянная Планка *ћ*=1,05·10-34 Дж·с, а масса атома углерода *m*=1,99·10-26 кг, определить проекции скорости *Δυx* его теплового движения?

*[Δυx=0,11·103 м/с]*

**5.4.** Неопределенность скорости пылинки массой *m*=10-9 кг составляет *Δυx* = 10,5 ·10-19 м/с. Учитывая, что постоянная Планка *ћ*=1,05·10-34 Дж·с, найти неопределенность положения пылинки в пространстве *Δx*(в мкм).

*[Δx=0,1 мкм]*

**5.5.** Протон локализован в пространстве в пределах *Δx*=1,0 мкм. Учитывая, что постоянная Планка *ћ*=1,05·10-34 Дж·с, а неопределенность скорости *Δυx* =6,6·10-2 м/с, определить массу протона.

*[m*=1,67·10-27 кг*]*

**5.6.** Ширина энергетического уровня атома в возбужденном состоянии $∆E=6,6 ·10^{-8} эВ$. Учитывая, что постоянная Планка *ћ*=6,6∙10-16эВ∙с, определить время жизни атома в этом состоянии (в нс).

*[Δt=*10 нс*]*

**5.7.** На фотографии, полученной с помощью камеры Вильсона, ширина следа электрона составляет 0,8∙10-3 м. Найти неопределенность в нахождении его скорости.

*[Δυx=14,4·10-3м/с]*

**5.8.** Среднее время жизни π+-мезона равно 2,5.10-8 c. Какова должна быть энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать π+-мезон?

*[ΔЕ*≥2,1∙10-27 Дж*]*

**5.9.** Какова должна быть кинетическая энергия электрона в пучке, используемом для исследования структуры с линейными размерами *l* =7·10-7 м.

[*T*= 30 эВ*]*

**5.10.** *α* – частица находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину ящика *l* , если известно, что минимальная энергия *α* – частицы $E=8 МэВ$.

*[l* =0,7·10-14 м*]*

**VI. Элементы теории относительности.**

1. Лоренцево сокращение длины:

$l=l\_{0}\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}$;

*l –* длина предмета в неподвижной системе отсчета;

*l0  -* длина предмета в системе отсчета, движущейся со скоростью *υ*;

*υ* – скорость движения предмета;

*c* – скорость света.

1. Относительность промежутков времени:

$∆t=\frac{∆t\_{0}}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$;

*Δt* – длительность события, измеренная по часам, находящимся в неподвижной системе отсчета,

*Δt0 –* длительность события, измеренная по часам, находящимся в системе отсчета, движущейся со скоростью *υ*.

1. Релятивистская масса:

$m=\frac{m\_{0}}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$,

*m* – масса тела, движущегося со скоростью *υ*.

*m0* – масса покоя.

$E=\frac{m\_{0}c^{2}}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$; $T=m\_{0}c^{2}(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}-1)$,

*T* – кинетическая энергия частицы, движущейся со скоростью *υ*.

*E* – полная энергия частицы, движущейся со скоростью *υ*.

*m0c2* – энергия покоящейся частицы.

$p=\frac{m\_{0}υ}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$,

*p* – импульс частицы, движущейся со скоростью *υ*.

**Примеры решения задач.**

*Пример 1.* В лабораторной системе отсчета измерили время жизни покоящейся нестабильной частицы и получили результат *τ0*. В результате ядерной реакции образовалась такая же частица, обладаю­щая в лабораторной системе отсчета скоростью *υ=*0,6с. Какой путь она сумеет пройти в этой системе до распада?

Решение: Вычислим время жизни быстрой частицы в лабораторной системе отсчета:

$τ=\frac{τ\_{0}}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{с^{2}}}}$.

Путь, который она успеет пройти до распада:

$$S=υτ=\frac{0,6cτ\_{0}}{\sqrt{1-0,6^{2}}}=0,75cτ\_{0}$$

*Пример 2.* Релятивистская масса частицы *m* в *К*-системе отсчета, в два раза превышает массу *m0* (массу покоя). Определите скорость частицы в этой системе отсчета.

Решение: Релятивистская масса вычисляется как отношение массы частицы к релятивистскому корню $m\_{p}=\frac{m\_{0}}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$.

По условию задачи *mр= 2m0*, следовательно $\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}=\frac{1}{2}$;

$$υ=\frac{\sqrt{3}}{2}с=0,86с=2,6∙10^{8} м/с.$$

*Пример 3.* Определите скорость движения частицы, при которой релятивистский импульс частицы в 1,25 раза превышает ее ньютоновский импульс.

Решение: Ньютоновский импульс частицы *р0 =mυ;* (1)

релятивистский импульс частицы $p\_{p}=\frac{mυ}{ \sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$. (2)

Согласно условию задачи:

$$\frac{p\_{p}}{p\_{н}}=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{с^{2}}}}=1,25=\frac{5}{4}, 1-\frac{υ^{2}}{с^{2}}=\frac{16}{25}, υ=\frac{3}{5}с; υ=0,6с=1,8∙10^{8} м/с.$$

Пример 4. При какой скорости движения частицы ее кинетическая энергия равна ее энергии покоя?

Решение:Энергия покоя частицы Е0=тс2 (1). Кинетическая энергия частицы:

$Е\_{к}=mc^{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}-1\right)$ (2);

Приравнивая (1) и (2), находим величину *υ*:

$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}=2;$ $\frac{υ^{2}}{c^{2}}=\frac{3}{4}; υ=\frac{\sqrt{3}}{2}с≈0,87с=2,6∙10^{8} м/с.$

Пример 5. Релятивистское сокращение длины ракеты составляет 20%. При этом скорость ракеты равна*…*

Решение:Движение макроскопических тел со скоростями, соизмеримыми со скоростью света в вакууме, изучается релятивистской механикой. Одним из следствий преобразований Лоренца является так называемое Лоренцево сокращение длины, состоящее в том, что линейные размеры тела сокращаются в направлении движения: $l=l\_{0}\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}$. Здесь $l\_{0}$ - длина тела в системе отсчета, относительно которой тело неподвижно; l - длина тела в системе отсчета, относительно которой тело движется со скоростью υ. При этом поперечные размеры тела не изменяются. По условию релятивистское сокращение длины ракеты $\frac{l\_{0}-l}{l\_{0}}=0,2 \rightarrow \frac{l\_{0}-l\_{0}\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}{l\_{0}}=0,2.$ Отсюда скорость ракеты *υ*=0,6c.

Пример 6. Частица движется со скоростью 0,8 *с* (*с* - скорость света в вакууме). Тогда ее масса по сравнению с массой покоя…

Решение: Зависимость релятивистской массы частицы от ее скорости определяется по формуле: $m=\frac{m\_{0}}{\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}}$ *,* где *υ* - скорость частицы, *с* - скорость света, *m0* - масса покоя частицы, *m* - релятивистская масса частицы. Относительное изменение массы частицы составит:

$$\frac{m-m\_{0}}{m}=1-\frac{m\_{0}}{m}=1-\sqrt{1-\frac{υ^{2}}{c^{2}}}=1-0,6=0,4.$$

Следовательно, масса частицы увеличится на 40 %.

**Задачи для самостоятельного решения.**

**6.1.** Нейтрино летит со скоростью света относительно ракеты. Ракета сама движется относительно звезд с околосветовой скоростью *υ* = 0,9 c. Определить скорость нейтрино в системе "Звезды".

*[*с*]*

**6.2.** Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы его продольные размеры стали в 2 раза меньше?

*[*933,75∙106 В*]*

**6.3.** Протон движется со скоростью 0,7 скорости света. Найти импульс и кинетическую энергию протона.

*[р*= 4,91∙10-19кг∙м/с , *Т* = 6,02·10-11∙Дж*]*

**6.4.** Космическая ракета движется с большой относительной скоростью. Релятивистское сокращение её длины составило 36%. Определить скорость движения ракеты.

*[*2,3∙ 108 м /с*]*

**6.5.** При какой скорости движения кинетическая энергия электрона равна 5 МэВ ?

*[*2,99∙ 108 м/с*]*

**6.6.** Найти импульс и кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью 0,9с.

*[*5,6∙10-22 кг∙м/с ; 1,05∙10-13 Дж*]*

**6.7.** Найти скорость частицы, если её кинетическая энергия составляет половину энергии покоя.

*[*2,22∙ 108 м/с*]*

**6.8.** Какую скорость должно иметь движущееся тело, чтобы его продольные размеры уменьшились в 2 раза ?

*[*2,6 ∙108 м/с*]*

**6.9.** Во сколько раз увеличится продолжительность существования нестабильной частицы по часам неподвижного наблюдателя, если она начинает двигаться со скоростью, составляющей 99 скорости света.

 *[*в 7,1 раза*]*

**6.10.** На сколько увеличится масса частицы при ускорении её от начальной скорости, равной нулю, до скорости, равной 0,9 скорости света?

*[*8,6∙10-27 кг*]*

### Приложения

1. Основные физические постоянные.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Физическая постоянная | Обозна-чение | Значение |
| Заряд электрона | $$\overbar{e}$$ | 1,60·10-19 Кл |
| Заряд протона | *q* | 1,60·10-19 Кл |
| Заряд *α* - частицы | $$q\_{α}$$ | 3,20·10-19 Кл |
| Масса покоя электрона | $$m\_{\overbar{e}}$$ | 9,11·10-31 кг |
| Масса покоя протона | *mp* | 1,67·10-27 кг |
| Масса покоя *α* - частицы | *mα* | 6,68·10-27 кг |
| Скорость света в вакууме |  | 3,00·108 м/с |
| Постоянная Планка | =$\frac{h}{2π}$ | 6,63·10-34 Дж·с1,05·1034 Дж·с |
| Постоянная закона смещения Вина |  | 2,90·10-3 м·К |
| Постоянная Стефана – Больцмана |  | 5,67·10-8 Вт/м2·К4 |

2. Работа выхода электронов из металла (1эВ=1,6·10-19 Дж)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Металл* | , эВ | , 10-19 Дж |
| КалийЛитийНатрийПлатинаСереброЦинк | 2,22,32,56,34,74,0 | 3,53,74,010,17,56,4 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтин Н.А., Осинцев А.М. Физика. Часть 2. Электричество, магнетизм оптика. Курс лекция для студентов вузов, Кемерово, 2009.

2. Бахтин Н.А., Осинцев А.М. Физика. Часть 3. Строение и свойства вещества. Курс лекция для студентов вузов, Кемерово, 2011.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для студентов вузов по техн. (550000) и технол. (650000) направлениям. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 7-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2007. – 498 с. : ил.

4. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для студентов вузов по техн. (550000) и технол. (650000) направлениям. В 3 т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 9-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 317 с. : ил.

5. Трофимова, Т. И. Краткий курс физики с примерами решения задач : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – М. : КноРус, 2007. – 279 с. : ил.

6. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М. : Academia, 2008. – 557, [1] c. : ил. – (Высшее профессиональное образование).

Содержание

1. Предисловие………………..……………………………………………….3
2. Учебный материал по разделам ………………………………….......…...4

 - тепловое излучение………………………………….............................…..4

 - фотоэффект……………….………………………….............................…..7

 - световое давление…………………………………...............................…11

 - волны де Бройля…………...…………………………………………….14

 - соотношение неопределенностей Гейзенберга…………………..…….17

 - элементы теории относительности……………………………………...20

3. Приложение……………………………………………………………….25

4. Литература……………………………………...…………………………26

5. Содержание………………………………………………………………..27