

## Контрольная работа по физике (2 курс, семестр 3).

### Методические указания к контрольной работе

1. В процессе освоения материала Вы изучили теоретический материал лекций. Вы решили задачи для самостоятельного решения и выполнили лабораторные работы. При выполнении контрольной работы обязательно используйте примеры решения задач, приведенные в Практических занятиях и в Лабораторных работах и Дополнительные примеры решения задач.
2. Решите задачи из вашего варианта контрольной работы. Контрольная работа № 1 содержит всего 2 варианта. Номер варианта лабораторной работы определяется по последней цифре студенческого билета. Если последняя цифра нечетная – вариант 1. Если последняя цифра четная – вариант 2.
3. Возможные варианты создания файла с решениями:
  - a. напишите решения задач от руки, отсканируйте или сфотографируйте. Возможные расширения у полученного файла: \*.jpg, \*.bmp, \*.tif, \*.pdf. (Совет: если полученный файл имеет большой размер, можно перевести его для уменьшения размера в формат \*.pdf)
  - b. если есть возможность, можете набрать решения в текстовом редакторе. Возможные расширения у полученного файла: \*.doc, \*.rtf, \*.pdf.
4. Пришлите файл с решениями задач.

### При решении задач необходимо выполнять следующие правила:

1. Записать полностью условие задачи. Выписать все величины, входящие в условие, столбиком и выразить их в единицах Международной системы единиц (СИ).
2. Дать чертеж, поясняющий содержание задачи (в тех случаях, когда это возможно); выполнить его надо аккуратно, при помощи чертежных принадлежностей.
3. Указать основные законы и формулы, на которых базируется решение задачи, дать словесную формулировку этих законов, разъяснить употребляемые буквенные обозначения  
Если при решении задач применяется формула, полученная для частного случая, не выражающая физического закона, то ее следует вывести. Пояснения должны быть краткими, но исчерпывающими.
4. Решить задачу в общем виде, т.е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи и взятых из таблиц.  
Таблицы физических величин находятся в сборниках задач и справочниках.
5. Подставить в рабочую формулу размерности или сокращенные обозначения единиц измерения величин и убедиться в правильности размерности искомой величины (см. примеры решения задач).
6. Подставить в окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, числовые значения, выраженные в единицах системы СИ.  
Несоблюдение этого правила приводит к неверному результату.
7. Произвести вычисление величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений.

### Дополнительные примеры решения задач.

Закон сохранения энергии, записанный для взаимодействия фотона с электроном в металле, есть уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{в}} + \frac{mv^2}{2},$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота падающего света,  $A_{\text{в}} = h\nu_{\text{кр}}$  – работа выхода электрона из металла ( $\nu_{\text{кр}}$  – красная граница),  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона.

трона,  $v$  – скорость электрона,  $\frac{mv^2}{2} = qU_3$  – кинетическая энергия электрона ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$

Кл – заряд электрона,  $U_3$  – запирающее напряжение).

При решении задач необходимо учитывать, является ли рассматриваемая в задаче микрочастица (электрон) классической или релятивистской. Для этого нужно сравнить ее скорость  $v$  со скоростью света или кинетическую энергию частицы  $T$  с ее энергией покоя  $E_0 = m_0c^2$ , если  $v \ll c$  или  $T \ll E_0$ , то частица является классической, если сравниваемые величины соизмеримы, то частица будет релятивистской.

## Фотоэффект

**Пример 1.** Определить скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовыми лучами с длиной волны 0,155 мкм; 2)  $\gamma$ -лучами с длиной волны 2,47 пм.

Дано:  
 $\lambda_1 = 0,155 \cdot 10^{-6}$  м  
 $\lambda_2 = 2,47 \cdot 10^{-12}$  м  
 $v_1 = ?$   $v_2 = ?$

Решение:

Рассмотрим уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$\varepsilon = A + T,$$

где  $\varepsilon$  – энергия фотона, падающего на поверхность металла и передаваемая фотоэлектрону,

$A$  – работа выхода фотоэлектрона из металла,

$T$  – кинетическая энергия, которой обладает фотоэлектрон, покинувший металл.

Энергия фотона вычисляется по формуле

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

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

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света,

$\lambda$  – длина волны.

Работу выхода для серебра определим по таблице  $A = 4,7$  эВ.

В зависимости от того, какая энергия сообщается электрону фотоном, кинетическая энергия электрона может быть выражена или по классической формуле

$$T = \frac{mv^2}{2},$$

или по релятивистской формуле

$$T = E - E_0,$$

где  $E$  – полная энергия электрона,

$E_0 = m_0c^2 = 0,51$  МэВ =  $0,51 \cdot 10^6$  эВ – энергия покоя электрона.

Если энергия фотона  $\varepsilon \ll E_0$  много меньше энергии покоя электрона, то применима классическая формула, если же  $\varepsilon$  сравнима с энергией покоя электрона  $E_0$ , то кинетическая энергия определяется по релятивистской формуле.

1) Вычислим энергию фотона ультрафиолетовых лучей:

$$\varepsilon_1 = \frac{hc}{\lambda_1} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{0,155 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 12,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{12,8 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 8(\text{эВ}),$$

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

Полученная энергия  $8\text{эВ} \ll 0,51\text{ МэВ}$ , следовательно, кинетическую энергию фотоэлектрона можно выразить классической формулой и записать:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= A + \frac{mv_1^2}{2}, \\ v_1 &= \sqrt{\frac{2(\varepsilon_1 - A)}{m}}, \\ [v_1] &= \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{кг}\cdot\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}, \\ v_1 &= \sqrt{\frac{2(8 - 4,7)\cdot 10^{-19}}{9,11\cdot 10^{-31}}} = 1,08\cdot 10^6 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right).\end{aligned}$$

2) вычислим энергию фотона  $\gamma$ -лучей:

$$\begin{aligned}\varepsilon_2 &= \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{6,63\cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}\cdot 3\cdot 10^8 \text{ м/с}}{2,47\cdot 10^{-12} \text{ м}} = 0,803\cdot 10^{-13} \text{ Дж}, \\ \varepsilon_2 &= \frac{0,803\cdot 10^{-13}}{1,6\cdot 10^{-19}} = 0,51\cdot 10^6 \text{ (эВ)} = 0,51 \text{ (МэВ)}.\end{aligned}$$

Энергия фотона  $\varepsilon_2$ , равна энергии покоя электрона  $E_0$ , следовательно, кинетическая энергия фотоэлектронов должна быть выражена релятивистской формулой  $T = E - E_0$ .

Полная энергия  $E$  частицы определяется формулой

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$T = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Работа выхода электрона из серебра (4,7 эВ) значительно меньше энергии фотона и энергии покоя электрона, следовательно, работой выхода можно пренебречь, и уравнение Эйнштейна запишется в виде:

$$\varepsilon_2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Учитывая, что  $\varepsilon_2 = E_0 = m_0 c^2$ , можно записать:

$$\begin{aligned}1 &= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1, \\ v_2 &= \frac{\sqrt{3}}{2} c = \frac{1,73}{2} \cdot 3\cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 2,6\cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.\end{aligned}$$

Ответ:  $v_1 = 1,08\cdot 10^6 \text{ м/с}$ ,  $v_2 = 2,6\cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

## Фотоэффект

**Пример 2.** На катод фотоэлемента падают монохроматические лучи с длиной волны  $\lambda = 150 \text{ нм}$ . Красная граница фотоэффекта  $\lambda_0 = 200 \text{ нм}$ . Найти наименьшее значение задерживающей разности потенциалов  $U_{\min}$ , которую нужно приложить к фотоэлементу, чтобы прекратить фототок.

$$\begin{array}{l} \text{Дано:} \\ \lambda = 150 \cdot 10^{-9} \text{ м} \\ \lambda_0 = 200 \cdot 10^{-9} \text{ м} \\ U_{\min} = ? \end{array}$$

Решение:

Для того, чтобы прекратился фототок, необходимо, чтобы электроны, вылетающие из катода под действием света с длиной волны  $\lambda$ , не достигали анода. Это возможно в том случае, если между анодом и катодом фотоэлемента приложена задерживающая разность потенциалов. Электроны, вылетающие из катода и имеющие кинетическую энергию  $T$ , расходуют ее на совершение работы по преодолению задерживающего поля.

Работа в электростатическом поле определяется формулой

$$A = qU,$$

52

где  $q$  – заряд электрона,

$U$  – разность потенциалов, проходимая электроном.

На основании вышесказанного:

$$qU_{\min} = T_{\max}.$$

На основании уравнения Эйнштейна энергия фотона  $\varepsilon$ , передаваемая электрону, расходуется на работу выхода  $A$  и кинетическую энергию фотоэлектрона  $T$ :

$$\varepsilon = A + T_{\max}.$$

Энергия фотона определяется формулой

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

Зная красную границу фотоэффекта, можно определить работу выхода. Красной границей фотоэффекта называется минимальная частота  $\nu_0$  или максимальная длина волны  $\lambda_0$ , при которых фотоэффект еще возможен, т.е.

$$A = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}.$$

Подставим значения  $\varepsilon$ ,  $T_{\max}$  и  $A$  в уравнение Эйнштейна, получим:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_0} + qU_{\min}.$$

Отсюда найдем  $U_{\min}$

$$U_{\min} = \frac{1}{q} \left( \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} \right) = \frac{hc}{q} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right),$$

Проверка размерности:

$$[U_{\min}] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м} / \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В},$$

Вычисления:

$$U_{\min} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left( \frac{1}{0,15 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{0,2 \cdot 10^{-6}} \right) = 2,1(\text{В}).$$

Ответ:  $U_{\min} = 2,1 \text{ В}$ .

53

### Тепловое излучение

**Пример 3.** Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны  $\lambda_m = 0,5 \text{ мкм}$ . Принимая Солнце за абсолютно черное тело, определить: а) энергетическую светимость Солнца; б) поток энергии, излучаемой Солнцем.

Дано: $\lambda_m = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ $r = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$ $R_\odot = ? \quad \Phi = ?$	Решение: Энергетическая светимость $R_\odot$ абсолютно черного тела выражается формулой Стефана - Больцмана: $R_\odot = \sigma T^4,$
--	--

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

$T$  – абсолютная температура излучающей поверхности.  
Температуру определим из закона смещения Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T} \quad \text{или} \quad T = \frac{b}{\lambda_m},$$

где  $\lambda_m$  – длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела,  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

Выразив из закона смещения Вина температуру  $T$  и подставив ее в формулу закона Стефана - Больцмана, получим:

$$R_\odot = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^4,$$

$$[R_\odot] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \left( \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{м}} \right)^4 = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$R_\odot = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6}} \right)^4 = 6,4 \cdot 10^7 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

Поток энергии  $\Phi$ , излучаемой Солнцем, равен произведению энергетической светимости Солнца на площадь его поверхности  $S$ :

$$\Phi = R_\odot \cdot S,$$

где  $S = 4\pi r^2$ ,  $r = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$  – радиус Солнца.

Таким образом:

$$\Phi = 4\pi r^2 R_\odot,$$

Проверка размерности:

$$[\Phi] = \text{м}^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = \text{Вт},$$

Вычисления:

$$\Phi = 4\pi \cdot (7 \cdot 10^8)^2 \cdot 6,4 \cdot 10^7 = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ (Вт)}.$$

Ответ:  $R_\odot = 6,4 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\Phi = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ .

**Пример 4.** Вольфрамовая нить накаливается в вакууме током силой  $I = 1 \text{ А}$  до температуры  $T_1 = 1000 \text{ К}$ . При какой силе тока нить накалится до температуры  $T_2 = 3000 \text{ К}$ ? Коэффициенты поглощения вольфрама и его удельные сопротивления, соответствующие температурам  $T_1$  и  $T_2$ , равны:  $a_1 = 0,115$ ,  $a_2 = 0,334$ ,  $\rho_1 = 25,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_2 = 96,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Дано:  
 $I = 1 \text{ A}$   
 $T_1 = 10^3 \text{ K}$   
 $T_2 = 3 \cdot 10^3 \text{ K}$   
 $a_1 = 0,115$   
 $a_2 = 0,334$   
 $\rho_1 = 25,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$   
 $\rho_2 = 96,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$   
 $I_2 = ?$

Решение:  
 При установившейся температуре ежесекундно потребляемая нитью электрическая энергия (мощность) равна потоку излучения, испускаемому нитью, т.е.

$$P = \Phi.$$

Мощность, потребляемая вольфрамовой нитью от источника электроэнергии

$$P = I^2 R,$$

где  $I$  – сила тока,

$R = \rho \frac{l}{S_{\text{сеч}}}$  – сопротивление нити при данной температуре,

$\rho$  – удельное сопротивление нити,

$l$  – длина нити,

$S_{\text{сеч}}$  – площадь поперечного сечения нити.

$$P = I^2 \rho \frac{l}{S_{\text{сеч}}}.$$

Вольфрамовая нить не является абсолютно черным телом, поэтому:

$$\Phi = a \cdot R_0 S_{\text{пов}} = a \cdot \sigma T^4 S_{\text{пов}}.$$

где  $S_{\text{пов}}$  – площадь поверхности нити.

Таким образом:

$$I^2 \rho \frac{l}{S_{\text{сеч}}} = a \cdot \sigma T^4 S_{\text{пов}}.$$

Записав это уравнение дважды для разных температур  $T_1$  и  $T_2$ , получим:

$$I_1^2 \rho_1 l = a_1 \cdot \sigma T_1^4 S_{\text{пов}} S_{\text{сеч}},$$

$$I_2^2 \rho_2 l = a_2 \cdot \sigma T_2^4 S_{\text{пов}} S_{\text{сеч}}.$$

Разделим эти два уравнения почленно и найдем

$$\left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{a_2}{a_1} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4,$$

$$I_2 = I_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^2 \sqrt{\frac{a_2 \rho_1}{a_1 \rho_2}}.$$

Проверка размерности:

$$[I_2] = \text{A} \left( \frac{\text{K}}{\text{K}} \right)^2 \sqrt{\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{м}}} = \text{A}.$$

Вычисления:

$$I_2 = 1 \left( \frac{3 \cdot 10^3}{10^3} \right)^2 \sqrt{\frac{0,334 \cdot 25,7 \cdot 10^{-8}}{0,115 \cdot 96,2 \cdot 10^{-8}}} = 7,9 (\text{A}).$$

Ответ:  $I_2 = 7,9 \text{ A}$ .

### Вариант 1

1. Уравнение изменения со временем заряда на обкладках конденсатора в колебательном контуре  $q = 50 \cdot \cos 10^5 \pi t$  (мкКл). Емкость конденсатора  $C = 0,1$  мкФ. Найти 1) период колебаний, 2) закон изменения со временем силы тока в цепи.
2. В баллоне содержится газ при температуре  $t_1 = 100^\circ \text{C}$ . До какой температуры нужно нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 2 раза?
3. На стекло падает плоская волна. Отраженные лучи полностью поляризованы. Определить угол преломления и скорость света в стекле.
4. Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности металла, полностью задерживаются при приложении обратного напряжения  $U_3 = 3$  В. Фотоэффект для этого металла начинается при частоте падающего монохроматического света  $\nu_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ . Определить: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) частоту применяемого облучения.
5. Диаметр вольфрамовой спирали электрической лампочки равен 0,3 мм, длина спирали 5 см. При включении в цепь напряжением 127 В через лампочку идет ток силой 0,3 А. Найти температуру лампочки. Считать, что при установлении равновесия все выделяющееся в нити тепло теряется в результате лучеиспускания. Считать, что при данной температуре энергетическая светимость вольфрама определяется по формуле  $R_3' = 0,3 R_3$ , где  $R_3$  – энергетическая светимость абсолютно черного тела.
6. Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 15$  мТл по окружности радиусом  $R = 1,4$  м. Определить длину волны де Бройля для протона.
7. Записать уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона, находящегося в атоме водорода. Какую величину можно найти, решая это уравнение? Каков физический смысл волновой функции?

### Вариант 2

1. Уравнение изменения со временем заряда на обкладках конденсатора в колебательном контуре  $q = 20 \cdot \sin 10^6 \pi t$  (мкКл). Емкость конденсатора  $C = 0,1$  мкФ. Найти 1) период колебаний, 2) закон изменения со временем силы тока в цепи.
2. Баллон вместимостью  $V = 10$  л содержит углекислый газ. Давление газа  $p = 1$  МПа, температура  $T = 300$  К. Определить массу газа.
3. При отражении света от поверхности стекла отраженный луч полностью поляризован, если угол преломления равен  $30^\circ$ . Определить показатель преломления стекла.
4. Задерживающее напряжение для платиновой пластинки (работа выхода 6,3 эВ) составляет 3,7 В. При тех же условиях для другой пластинки задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определить работу выхода электронов из этой пластинки.
5. Диаметр вольфрамовой спирали электрической лампочки равен 0,3 мм, длина спирали 5 см. При включении в цепь напряжением 127 В через лампочку идет ток силой 0,3 А. Найти температуру лампочки. Считать, что при установлении равновесия все выделяющееся в нити тепло теряется в результате лучеиспускания. Считать, что при данной температуре энергетическая светимость вольфрама определяется по формуле  $R_3' = 0,3 R_3$ , где  $R_3$  – энергетическая светимость абсолютно черного тела.
6. Протон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 20$  мТл по окружности радиусом  $R = 50$  см. Определить длину волны де Бройля для протона.
7. Записать уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона, находящегося в атоме водорода. Какую величину можно найти, решая это уравнение? Каков физический смысл волновой функции?