

Практическое занятие по физике (часть 2) «Тепловое излучение. Фотоэффект»

Методические указания к практическому занятию

1. Проработайте материал Лекций 1, 2, 3 и примеры решения задач. В лекциях есть все необходимые для решения задач формулы.
2. Изучите примеры решения задач.
3. Решите задачи и выполните задания из раздела «Задачи для самостоятельного решения к практическому занятию».
4. Возможные способы 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**.
 - c. пожалуйста, **не присылайте файлы в формате *.docx**.
5. Загрузите файл с решениями задач в систему.

Правила оформления задач:

1. Записать полностью условие задачи. Выписать все величины, входящие в условие, – столбиком и выразить их в одних единицах (преимущественно в Международной системе единиц СИ).
2. Осмыслить физическую сущность задачи, представив ее наглядно в виде четкого рисунка, на котором, хотя бы условно, указать все параметры, характеризующие явления, на основе которых построено условие задачи.
3. Указать основные законы и формулы, на которых базируется условие задачи, разъяснить буквенные обозначения, употребляемые при написании формул. Векторные величины внести на чертеж. Если при решении задачи применяется формула, полученная для частного случая, не выражающая какой-нибудь физической закон или не являющаяся определением какой-нибудь физической величины, то ее следует вывести. Пояснения должны быть краткими, но исчерпывающими.
4. Решить задачу сначала в общем виде, то есть в буквенных обозначениях, заданных в условии задачи и взятых из таблиц.
5. Подставив в рабочую формулу размерности, убедиться в правильности размерности искомой величины.
6. Подставить в конечную формулу числовые значения. При вычислениях соблюдать правила приближенных вычислений и округлений.

Примеры решения задач

Изучение законов теплового излучения имеет принципиальное значение, т.к. проблема излучения абсолютно черного тела привела к квантовой гипотезе совершенно чуждой классическим представлениям.

Согласно квантовой гипотезе электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon = h\nu.$$

Этим было положено начало квантовой механики.

Энергетическая светимость R_Σ абсолютно черного тела выражается формулой Стефана - Больцмана:

$$R_\Sigma = \sigma T^4,$$

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

T – абсолютная температура излучающей поверхности.

Закон смещения Вина:

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

где λ_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.

Пример 1. Температура абсолютно черного тела увеличилась в 2 раза. Во сколько раз изменилась его энергетическая светимость? Длина волны, соответствующая максимуму излучения?

Дано:	Решение.
$\frac{T_2}{T_1} = 2$	Энергетическая светимость R_Σ абсолютно черного тела выражается формулой Стефана - Больцмана:
$\frac{R_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 1}} = ?$	$R_\Sigma = \sigma T^4,$
$\frac{\lambda_{m2}}{\lambda_{m1}} = ?$	где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – постоянная Стефана – Больцмана,
	T – абсолютная температура излучающей поверхности.
	$R_{\Sigma 1} = \sigma T_1^4,$
	$R_{\Sigma 2} = \sigma T_2^4.$

$$\frac{R_{\Sigma 2}}{R_{\Sigma 1}} = \frac{\sigma(T_2)^4}{\sigma(T_1)^4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = 2^4 = 16.$$

По закону смещения Вина:

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

где λ_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.

$$\lambda_{m1} = \frac{b}{T_1}, \quad \lambda_{m2} = \frac{b}{T_2},$$

$$\frac{\lambda_{m2}}{\lambda_{m1}} = \frac{b}{T_2} \cdot \frac{T_1}{b} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{2}.$$

Ответ: энергетическая светимость увеличилась в 16 раз, длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, уменьшилась в 2 раза.

Пример 2. Исследование спектра излучения Солнца показывает, что максимум спектральной плотности энергетической светимости соответствует длине волны $\lambda_m = 0,5$ мкм. Принимая Солнце за абсолютно черное тело, определить: а) энергетическую светимость Солнца; б) поток энергии, излучаемой Солнцем.

$$\begin{array}{l} \text{Дано:} \\ \lambda_m = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} \\ r = 7 \cdot 10^8 \text{ м} \\ R_\odot = ? \quad \Phi = ? \end{array}$$

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

«Фотоэффект»

Явление, называемое фотоэлектрическим эффектом (или фотоэффектом), было обнаружено в 1887 г. Г.Герцем. Оно заключается в освобождении электронов, находящихся в связанном состоянии в веществе, под действием электромагнитного излучения. Различают внешний и внутренний фотоэффекты. При внешнем фотоэффекте (фотоэлектронная эмиссия) происходит испускание электронов в вакуум. Его можно наблюдать в любых твердых телах и в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация). Фотоэлектронная эмиссия является результатом трех последовательных процессов: поглощения фотона и появления электрона с высокой энергией; движения этого электрона к поверхности, при котором часть его энергии может рассеяться за счет взаимодействия с другими электронами, дефектами или фононами; выхода электрона в вакуум или другую среду через потенциальный барьер на границе раздела. В случае внутреннего фотоэффекта электроны под действием электромагнитного излучения совершают переходы из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Фотоэффект – явление чисто квантовое.

Исследование фотоэффекта впервые производилось по схеме, приведенной на рис. 1. Пучок монохроматического света направляется на один из двух электродов вакуумной трубки. Электроды трубки находятся под напряжением. Отрицательный потенциал (–) подается на электрод, называемый катодом, а положительный (+) – на анод. Катод называемый также фотокатодом, покрывается слоем фоточувствительного материала, способным легко испускать электроны. Электрон, вылетая из фотокатода под действием света, попадает в электрическое поле, вектор напряженности которого направлен от анода к катоду. При этом в вакуумной трубке протекает электрический ток или фототок, который можно измерить амперметром (на схеме вместо амперметра включен гальванометр G).

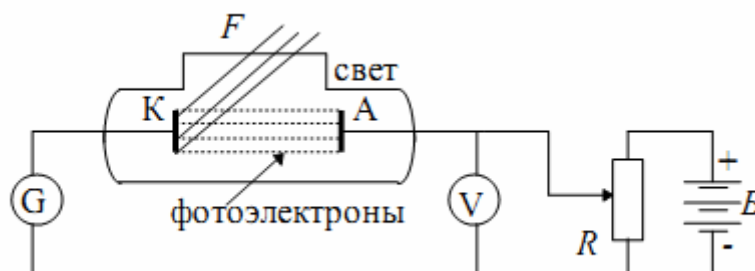


Рис. 1. Электрон выбивается светом из фотокатода (–) и летит к аноду (+).

При увеличении приложенного к аноду напряжения U величина фототока увеличивается. График зависимости силы тока в цепи от приложенного напряжения называется вольт амперной характеристикой. Вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента изображена на рис. 2.

Для того, чтобы фототок прекратился, нужно подать на фотоэлемент напряжение противоположного знака (на анод подать «–», а на катод «+»). При определенном значении такого напряжения фототок станет равным нулю. Это напряжение (запирающее или задерживающее $U_{\text{зап}}$) можно определить из вольт-амперной характеристики (см. рис. 2).

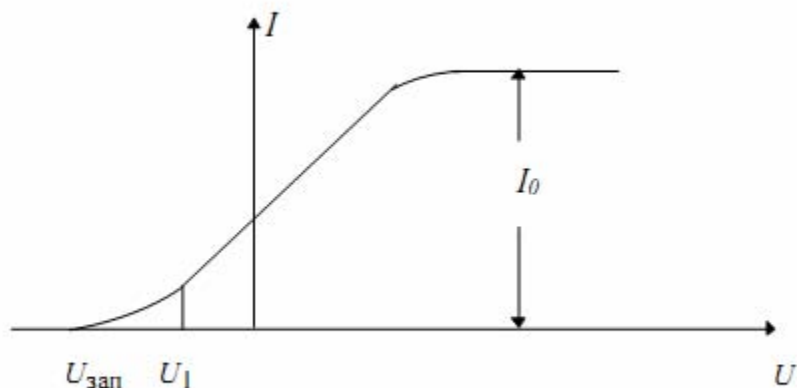


Рис.2

Этот рисунок показывает, что с увеличением разности потенциалов между анодом и катодом фототок вначале растет, а затем достигает максимального значения I_0 , которое называется током насыщения. Очевидно, ток насыщения соответствует максимальному числу электронов, которые могут быть выбиты из катода светом данной интенсивности.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Объяснение явления фотоэффекта было дано А. Эйнштейном (1905 г.) на основе гипотезы о том, что свет представляет собой не волну, а поток частиц – световых квантов, или фотонов. Внешний фотоэффект является результатом взаимодействия фотонов с находящимися у поверхности металла электронами. При столкновении с одним из таких электронов фотон полностью передает ему свою энергию и, если она достаточно велика, электрон сможет преодолеть силы, удерживающие его в металле, и вылететь наружу. Каждый электрон выбивается из металла одним фотоном, поэтому его скорость определяется лишь энергией фотона, т.е. частотой падающего света. Повышение интенсивности света приводит к увеличению плотности фотонов. Следовательно, увеличивается число соударений в единицу времени фотонов с электронами. Это объясняет прямую зависимость между интенсивностью падающего света и силой фототока. Применив к электрон-фотонному столкновению закон сохранения энергии, Эйнштейн получил уравнение, определяющее максимальную скорость электронов:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν – частота падающего света, A – работа выхода электрона, m – масса электрона, v – максимальная скорость, с которой электрон вылетает из фотокатода. В пространстве между фотокатодом и анодом величина этой скорости может меняться под действием электрического поля.

Если известно запирающее напряжение $U_{\text{зап}}$, то уравнение Эйнштейна можно записать в следующем виде:

$$h\nu = A + eU_{\text{зап}}, \quad (2)$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона

Задачи для самостоятельного решения к практическому занятию

1. Что такое абсолютно черное тело?
2. Можно ли считать Солнце абсолютно черным телом? Приведите примеры абсолютно черных тел.
3. Какие звезды имеют более высокую температуру: красные гиганты или голубые карлики? Ответ поясните.
4. Температура абсолютно черного тела уменьшилась в 1,5 раза. Во сколько раз изменилась его энергетическая светимость?
5. Что такое квант света? как найти его энергию?
6. Лабораторная работа «Фотоэффект». Перед выполнением изучите раздел «Фотоэффект» данного руководства

Выполнение лабораторной работы.

Постановка задачи. Студент исследовал вольт-амперную характеристику вакуумного фотоэлемента. Принципиальная схема установки приведена на рис.1. На катод фотоэлемента направлялось излучение с длиной волны $\lambda=650$ нм. При помощи ручки потенциометра R студент менял напряжение, приложенное к фотоэлементу, и записывал в таблицу значения приложенного напряжения U и силы тока I. (см. таблицу 1)

U, В	-0,6	-0,2	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4			
I, мкА	0	0,2	0,6	1,5	1,9	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4			

Таблица 1

Задание

1) По результатам, приведенным в таблице 1, построить вольт-амперную характеристику вакуумного фотоэлемента.

На всякий случай правила построения графиков приведены ниже в приложении к лабораторной работе. В данной лабораторной работе разрешается выполнить график как от руки, так и на компьютере при помощи любой программы. График должен быть вставлен в Ваш файл с расширением *.jpg, *.bmp, *.tif, *.pdf.) Не забывайте, что на компьютерном графике, как и на графике, построенном от руки, должны быть хорошо видны как экспериментальные точки (например, они выделяются крестиками или жирными точками), так и построенная вами кривая.

2) Из вольт-амперной характеристики определить запирающее напряжение $U_{\text{зап.}}$ (напряжение берем по модулю)

3) Из вольт-амперной характеристики определить ток насыщения.

4) Из уравнения Эйнштейна (2) определить работу выхода A. Использовать формулу

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \text{ где } c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с – скорость света в вакууме.}$$

Приложение

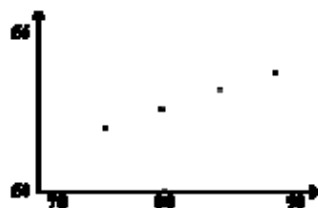
Требования к построению графиков:

- 1) График выполнять на клетчатой бумаге или на миллиметровке (предпочтительно). Можно выполнять и в компьютерной программе.

- 2) Размер графика должен быть достаточно большим (чтобы все точки хорошо были видны). (Это требование должно быть выполнено и для компьютерных графиков)
- 3) Масштаб и начало отсчета нужно выбирать так, чтобы график занимал все поле, отведенное для него. (Это требование должно быть выполнено и для компьютерных графиков)



Пример неудачного выбора масштаба

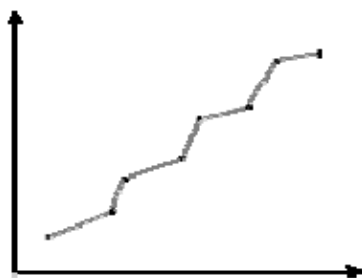


Пример правильного выбора масштаба

Масштаб должен быть простым. Проще всего, если единице измеренной величины (или 10; 100; 0.1 единицы и т.д.) соответствует 1 см. Можно также выбрать такой масштаб, чтобы 1 см соответствовал 2 или 5 единицам.

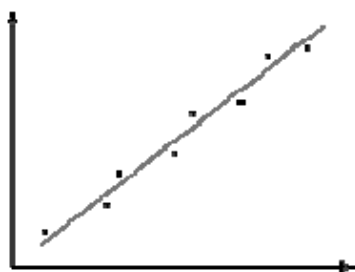
- 4) Оси должны быть подписаны, на осях указана размерность (Это требование должно быть выполнено и для компьютерных графиков)
- 5) Засечки на осях должны идти через **равные** промежутки (Это требование должно быть выполнено и для компьютерных графиков)
- 6) Экспериментальные точки, нанесенные на график в соответствии с расчетной таблицей, должны быть хорошо видны. (Сделайте их, если необходимо, более жирными или изобразите в виде крестиков или кружочков). (Это требование должно быть выполнено и для компьютерных графиков)
- 7) Сам график - это **плавная** линия, проходящая через нанесенные точки или проходящая наиболее близко к нанесенным экспериментальным точкам. График не должен сливаться с нанесенными точками. (Это требование должно быть выполнено и для компьютерных графиков)

Начинающие нередко соединяют экспериментальные точки просто ломаной линией, как показано на рисунке:



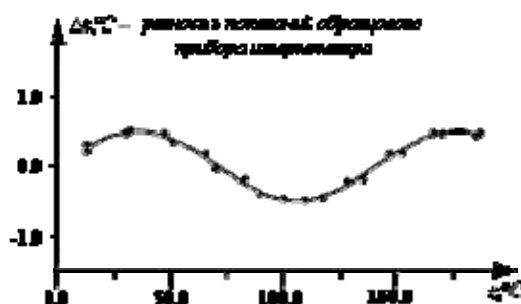
Пример неправильного построения графика

Следует ожидать, что график является плавной линией, а отклонения от плавной линии вызваны погрешностями эксперимента. Проводить кривую следует так, чтобы она лежала возможно ближе к точкам, и чтобы по обе стороны оказалось приблизительно равное их количество.



Пример правильного построения графика. График является плавной линией.

- 8) У графика должно быть название, кратко отражающее содержание построенной зависимости.



Пример построения графика.

(Засечки на осях через равные промежутки. Оси подписаны. Единицы измерения указаны. Экспериментальные точки хорошо видны.)