

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

И.Н. Анисина, Т.И. Пискарёва, А.С. Лелюхин

# ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

2-е издание, стереотипное

Оренбург

2019

УДК 537.5(076.5)

ББК 22.333я7

А67

Рецензент – доктор физико-математических наук, профессор Н.А. Манаков

**Анисина, И.Н.**

**А67**

Изучение явлений электронной эмиссии: методические указания / И.Н. Анисина, Т.И. Пискарёва, А.С. Лелюхин; Оренбургский гос. ун-т. 2-е издание, стереотипное – Оренбург: ОГУ, 2019. – 15 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по изучению видов электронной эмиссии. Работа включает теоретическое изложение материала, описание методики проведения опыта и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

УДК 537.5 (076.5)

ББК 22.333я7

© Анисина И.Н.,  
Пискарёва Т.И.,  
Лелюхин А.С., 2019  
© ОГУ, 2019

## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Изучение термоэлектронной эмиссии .....	4
1.1 Теоретические сведения .....	4
1.2 Экспериментальная часть .....	6
1.3 Контрольные вопросы .....	8
2 Лабораторная работа № 2. Изучение внешнего фотоэффекта .....	9
2.1 Теоретические сведения.....	9
2.2 Экспериментальная часть.....	13
2.3 Контрольные вопросы .....	14
Список использованных источников .....	15

# 1 Лабораторная работа № 1. Изучение термоэлектронной эмиссии

## Цель работы

1. Познакомиться с явлением термоэлектронной эмиссии и построение вольтамперной характеристики лампового диода.
2. Определить удельный заряд электрона.

## 1.1 Теоретические сведения

Свободные электроны при обычных температурах практически не покидают металл. Следовательно, в поверхностном слое металла должно быть задерживающее электрическое поле, препятствующее выходу электронов из металла в окружающий вакуум. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из металла, называется **работой выхода**.

Работа выхода зависит от химической природы металлов и от чистоты их поверхности.

Если сообщить электронам в металлах энергию, необходимую для преодоления работы выхода, то часть электронов может покинуть металл, в результате чего наблюдается **электронная эмиссия** – испускание электронов поверхностью твердого тела и жидкости.

**Термоэлектронная эмиссия** – это испускание электронов нагретыми металлами. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, растет. Исследования закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью вакуумного диода, представляющего собой баллон, содержащий два электрода: катод  $K$  и анод  $A$ . Если диод включить в цепь, как показано на рисунке 1, то при накаливании катода и подаче на анод положительного напряжения в анодной цепи диода возникнет ток. Если поменять полярность батареи  $B_A$ , то ток прекращается, как бы сильно катод не накаливали. Следовательно, катод испускает электроны.

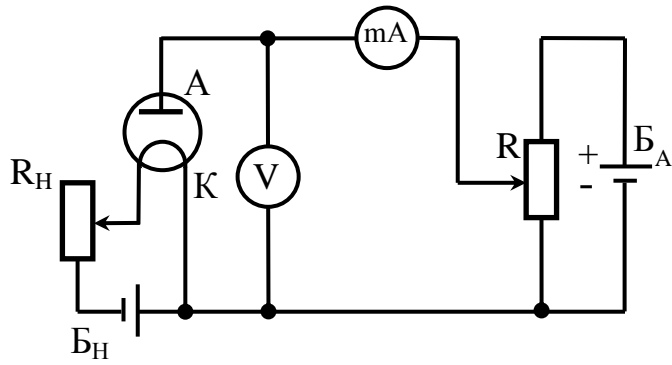


Рисунок 1

Если поддерживать температуру накаленного катода постоянной и снять зависимость анодного тока  $I_A$  от анодного напряжения  $U_A$  – вольт-амперную характеристику (рисунок 2), то оказывается, что она не является линейной, т.е. для вакуумного диода закон Ома не выполняется.

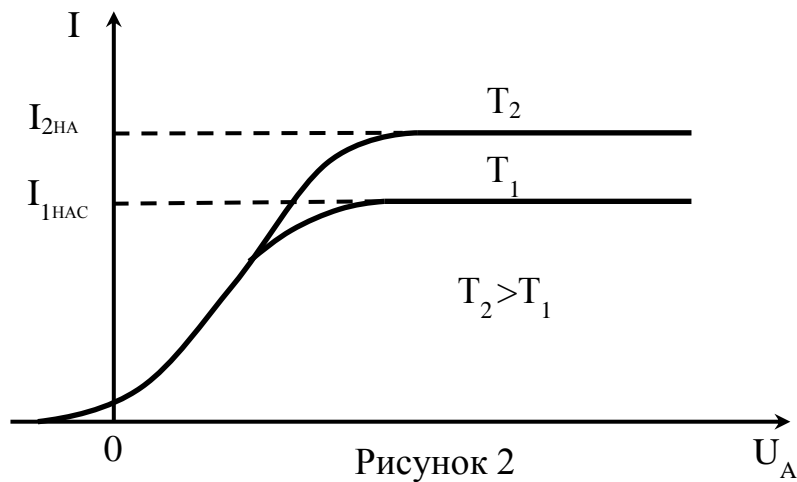


Рисунок 2

Зависимость термоэлектронного тока  $I_A$  от анодного напряжения  $U_A$  в области малых положительных значений напряжения описывается законом **трех вторых**:

$$I_A = \alpha U^3 \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

Выражение (1) было получено русским физиком С.А. Богуславским и американским физиком Ленгмюром. Оно читается так: анодный ток пропорционален анодному напряжению в степени три вторых.

Закон трех вторых выполняется при следующих допущениях:

- 1) начальные скорости электронов, испущенных катодом, настолько малы, что их можно считать равными нулю;
- 2) анодный ток далек от насыщения.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает до некоторого максимального значения  $I_{нас}$  называемого **током насыщения**. Это означает, что почти все электроны, покидающие катод, достигают анода, поэтому дальнейшее увеличение напряженности поля не может привести к увеличению термоэлектронного тока. На рисунке 2 представлены вольт-амперные характеристики для двух температур катода  $T_1$  и  $T_2$ , причем  $T_2 > T_1$

## 1.2 Экспериментальная часть

### 1.2.1 Проверка закона трех вторых.

Данная работа выполняется на установке, электрическая схема которой представлена на рисунке 1. С помощью данной установки необходимо убедиться в выполнении закона трех вторых.

1. Снимите вольт-амперную характеристику вакуумной лампы 1Ц11П (диод прямого накала) и результаты измерений  $I_A$  и  $U_A$  внесите в таблицу 1.

2. Постройте график зависимости  $I_A = f U_A$ .

Таблица 1 – Результаты измерений

$I_A, A$								
$U_A, B$								
$U_A^{3/2}, B$								

3. Постройте график зависимости  $I_A = f U_A^2$ . При наличии прямо пропорциональной зависимости закон трех вторых выполняется.

### 1.2.2 Определение удельного заряда электрона

Из графика зависимости  $I_A = f U_A^3$  найдите  $tga$ , как угловой коэффициент наклона графика к оси абсцисс:

$$tga = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_A^3} \left( \frac{K_l}{B^{3/2} \cdot c} \right), \quad (2)$$

для малых  $a$   $tga \approx a$ .

Теоретически доказано [4], что коэффициент пропорциональности  $a$ , связывающий  $I_A$  с  $U_A$ , может быть представлен как

$$a = b \frac{e}{m}, \quad (3)$$

где  $b$  – коэффициент пропорциональности, зависящий только от формы, геометрических размеров и расстояния между электродами.

Из уравнения (3) выразим удельный заряд электрона  $\frac{e}{m}$ :

$$\frac{e}{m} = \frac{a^2}{b^2} = \alpha a^2, \quad (4)$$

где введено обозначение  $\alpha = \frac{1}{b^2}$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров электродов лампы и расстояния между ними. Для вакуумного диода 1Ц11П можно принять, что  $\alpha = (1,24 \pm 0,09) \cdot 10^{21}$  ( $B^3 \cdot c^2 / \text{кг} \cdot \text{Кл}$ ).

Используя выражение (4), можно определить относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta(\frac{e}{m})}{(\frac{e}{m})} = \sqrt{\frac{\Delta\alpha^2}{\alpha^2} + 4 \frac{\Delta a^2}{a^2}}. \quad (5)$$

Пренебрегая величиной  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$  ввиду её малости, можно записать

$$\varepsilon = \frac{\Delta(\frac{e}{m})}{(\frac{e}{m})} = 2 \frac{\Delta a}{a}. \quad (6)$$

Приняв величину  $\frac{\Delta a}{a}$  равной 5 %, найдите ошибку  $\Delta \frac{e}{m}$  и запишите результат в виде:

$$\frac{e}{m} = \frac{e}{m} \pm \Delta \frac{e}{m} .$$

Сравните полученное значение  $\frac{e}{m}$  с известным из литературы значением удельного заряда электрона, равным примерно  $(1,76 \pm 0,01) \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Сделайте общий вывод по работе.

### 1.3 Контрольные вопросы

1. Поясните цель и порядок выполнения работы. Какие выводы вами сделаны по полученным результатам?
2. Расскажите подробно о термоэлектронной эмиссии.
3. Сформулируйте закон Ленгмюра – Богуславского. При каких условиях он выполняется?
4. Поясните метод определения удельного заряда электрона в данной работе.



## 2 Лабораторная работа № 2. Изучение внешнего фотоэффекта

### Цель работы:

Изучить основные законы фотоэффекта

### 2.1 Теоретические сведения

Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Это явление было открыто Г. Герцем в 1887 г. Он заметил, что проскакивание искры между шариками электрического разрядника облегчается, если один из шариков осветить ультрафиолетовыми лучами. Для исследования фотоэффекта Ленард и Томпсон предложили следующее устройство (рисунок 1).

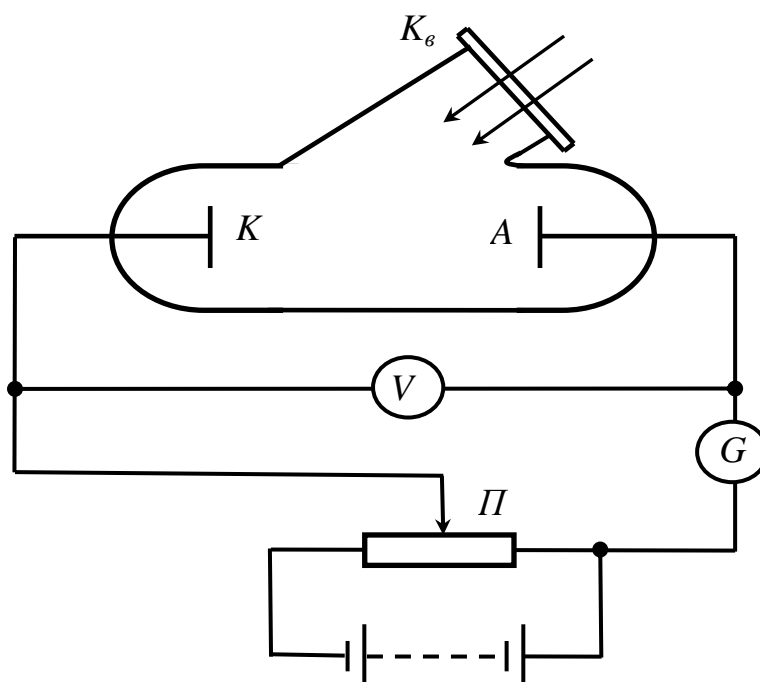


Рисунок 1

Свет проникающий через кварцевое окошко  $K_0$ , освещает катод  $K$ . В отличие от обычного стекла кварцевое пропускает ультрафиолетовые лучи. Это позволяет расширить диапазон длин волн при исследованиях. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду  $A$ . Гальванометр  $G$  измеряет ток, текущий в цепи.

Напряжение между анодом и катодом можно изменять при помощи потенциометра  $\Pi$ .

Полученная вольт - амперная характеристика (зависимость фототока  $I$  от напряжения между электродами  $U$ ) приведена на рисунке 2.

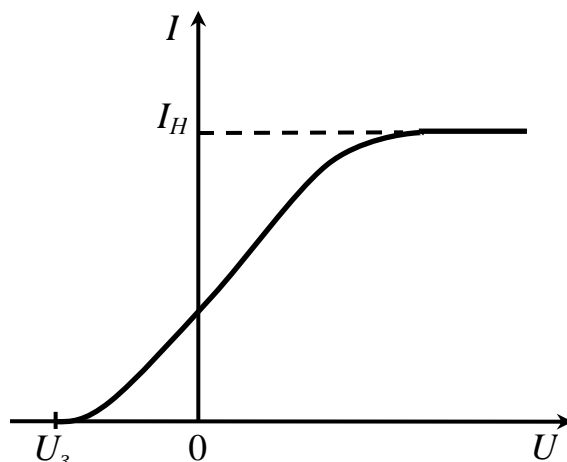


Рисунок 2

Характеристика снимается при неизменном потоке света, падающего на окошко  $Kв$ . Видно, что при некотором напряжении фототок достигает насыщения, то есть с ростом напряжения он остается постоянным. Это говорит о том, что все электроны, испущенные катодом, достигают анода. То есть, ток насыщения  $I_H$  определяется количеством электронов, испускаемых катодом в единицу времени. Постепенное увеличение тока на начальном участке кривой указывает на то, что электроны вылетают с катода с разными скоростями. Ненулевой ток при  $U = 0$  свидетельствует о том, что часть электронов обладает скоростями, позволяющими им долететь до анода самостоятельно, без помощи ускоряющего поля. Для обращения тока в нуль нужно приложить задерживающее напряжение  $U_3$ . Поэтому можно написать:

$$\frac{m V_{\max}^2}{2} = e U_3 \quad , \quad (1)$$

где  $\frac{mV_{\max}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия электрона, Дж;

$e$  – заряд электрона, Кл.

При движении электрона от катода к аноду его кинетическая энергия переходит в потенциальную в электростатическом поле катод-анод. Измерив задерживающее напряжение  $U_3$ , можно определить максимальное значение скорости фотоэлектронов.

Было выяснено, что максимальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а зависит только от его частоты – увеличение частоты приводит к возрастанию скорости. Экспериментальные зависимости не согласуются с классическими представлениями. Действительно, интенсивность электромагнитной волны пропорциональна квадрату амплитуды колебаний светового вектора  $E$ , где  $E$  – напряженность электрического поля. Под действием этого поля свободные электроны совершают колебания, чем больше интенсивность света, тем больше амплитуда колебаний. При большей амплитуде колебаний электрон должен вылетать с большей скоростью. То есть скорость фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности световой волны, что противоречило экспериментальным данным.

А. Эйнштейн показал, что все закономерности фотоэффекта объясняются, если предположить, что свет поглощается порциями (квантами) с энергией  $E = \hbar\omega$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\omega$  – циклическая частота световой волны. По предположению Эйнштейна энергия, поглощенная электроном, доставляется ему в виде кванта  $\hbar\omega$ , который поглощается им целиком. Часть этой энергии, равная работе выхода  $A$ , затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Работой выхода называется наименьшая энергия, которую необходимо сообщать электрону для того, чтобы удалить его из тела. Если электрон выбивается светом не у самой поверхности тела, а на некоторой глубине, то часть его энергии может быть потеряна вследствие случайных столкновений в веществе. Остаток энергии образует кинетическую энергию электрона, покинувшего вещество. В этом случае должно выполняться

соотношение:

$$\hbar\omega = \frac{1}{2} mV_m^2 + A \quad (2)$$

Фотоэффект и работа выхода в сильной степени зависят от состояния поверхности металла (в частности, от находящихся на ней окислов и адсорбированных веществ). В 1916 г. Милликен создал прибор, в котором исследуемые поверхности подвергались очистке в вакууме, после чего измерялась работа выхода и исследовалась зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света (эта энергия определялась путем измерения задерживающего потенциала  $U_3$ ). Результаты оказались в полном согласии с формулой (2).

Из формулы (2) вытекает, что в случае, когда работа выхода  $A$  превышает энергию кванта  $\hbar\omega$ , электроны не могут покинуть поверхность металла. Следовательно, для возникновения фотоэффекта необходимо выполнение условия  $\hbar\omega \geq A$  или

$$\omega \geq \omega_0 = \frac{A}{\hbar} \quad (3)$$

Для длины волны получается условие:

$$\lambda \leq \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar c}{A} \quad (4)$$

Частота  $\omega_0$  или длина волны  $\lambda_0$  называется красной границей фотоэффекта.

Резюмируя вышесказанное можно сформулировать законы фотоэффекта:

1) максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется

частотой света и не зависит от его интенсивности;

2) для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$  света, при которой еще возможен внешний фотоэффект ( $\nu_0$  зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности);

3) число фотоэлектронов  $n$ , вызываемых из катода за единицу времени, пропорционально интенсивности света (фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности  $E$  катода).

## 2.2 Экспериментальная часть

Для исследования фотоэлемента собирается схема, изображенная на рисунке 1. Осветительная лампочка  $L$  включается в сеть переменного тока с напряжением 220 В. В установке используется вакуумный фотоэлемент СЦ-4 (ФЭ). Реостат  $R$  служит для регулирования напряжения, подаваемого на ФЭ. Микроамперметром МКА измеряют фототок  $I$ , а вольтметром  $V$  – напряжение  $U$ , подаваемое на ФЭ.

*Задание 1. Снятие вольтамперной характеристики  $I(U)$ :*

1. Установите осветительную лампочку на расстоянии  $l = 25$  см от ФЭ.
2. Подключите осветительную лампочку к сети  $\sim 220$  В, а собранную цепь к сети 200 В постоянного тока.
3. Снимите вольтамперную характеристику ФЭ, занося в таблицу 1.

Таблица 1

$U, В$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
$I, мкА$														

4. Постройте график зависимости фототока от напряжения  $I = f U$ .
5. По графику определите силу тока насыщения  $I_H$ .

6. Пункты 2, 3, 4, 5 повторите для  $l = 40$  см.

*Задание 2. Снятие световой характеристики  $I(\Phi)$  фотоэлемента:*

Изменение светового потока  $\Phi$  достигается изменением расстояния  $l$  между нитью накала осветительной лампочки и приемной площадкой ФЭ.

1. Установите на ФЭ напряжение  $U = 200$  В.
2. Подключите осветительную лампочку к сети  $\sim 220$  В.
3. Снимите показания микроамперметра при разных значениях  $l$ , занося данные в таблицу 2.

Таблица 2

$l$ , м	0,40	0,35	0,30	0,25
$l^{-2}$ $l^{-2}$ , м <sup>2</sup>				
$I$ , мА				

4. Постройте график зависимости  $I = f l^{-2}$ . Учитывая, что  $\Phi \sim l^{-2}$ , сделайте вывод о зависимости между фототоком  $I$  и световым потоком  $\Phi$ .

### 2.3 Контрольные вопросы

1. Что такое работа выхода?
2. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна.
3. Объясните графики  $I = f U$  и световой характеристики  $I = f \Phi$ .
4. Можно ли объяснить фотоэффект с точки зрения классической электродинамики?
5. Чем объяснить наличие тока насыщения у вакуумных фотоэлементов?
6. Энергия, импульс и масса фотона.

## Список использованных источников

1. Савельев, И. В. Курс общей физики [Текст] : учебное пособие / И. В. Савельев. – 5-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – (Лучшие классические учебники). – ISBN 978-5-8114-1206-8. Т. 2 : Электричество и магнетизм. – 2011. – 343 с.: ил. – Прил.: с. 327-339.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст] : учебное пособие для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений / Т. И. Трофимова. – 19-е изд., стер. – Москва : Академия, 2012. – 559 с.
3. Детлаф, А. А. Курс физики [Текст] : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2000. – 718 с.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики [Текст] : в 5 т.: учеб. пособие для вузов / Д. В. Сивухин . – М. : Физматлит, 2002.. – ISBN 5-9221-0229-X. – ISBN 5-89155-077-6 Т. 3 : Электричество. – , 2002. – 656 с.