

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

---

Кафедра физики

Ю.В. Тихомиров, В.А. Степанова

## ФИЗИКА

**Учебно-методическое пособие**  
по выполнению лабораторной работы КМ 3-1к  
«Изучение внешнего фотоэффекта»

*для студентов I курса  
всех специальностей и направлений  
всех форм обучения*

Москва  
ИД Академии Жуковского  
2021

УДК 535.215  
ББК 53  
Т46

Рецензент:

*Новиков С.Н.* – канд. техн. наук, доцент

**Тихомиров Ю.В.**

Т46

Физика [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы КМ 3-1к «Изучение внешнего фотоэффекта» / Ю.В. Тихомиров, В.А. Степанова. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 12 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по учебному плану для студентов I курса всех специальностей и направлений всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 16.09.2021 г. и методического совета 19.10.2021 г.

**УДК 535.215**  
**ББК 53**

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА КМ 3-1к ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

### 1. Цель работы

Исследование закономерностей внешнего фотоэффекта; определение красной границы фотоэффекта, работы выхода электронов из материала фотокатода и постоянной Планка.

### 2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по теме «Квантовая природа излучения» по материалу лекций и учебников [1, 2]. Ознакомьтесь с компьютерной моделью и методикой проведения виртуального эксперимента в разделе 4 данного описания. Подготовьте ответы на вопросы из раздела 7. Оформите проект отчета по лабораторной работе.

### 3. Краткая теория

В результате многих физических явлений происходит электромагнитное излучение (ЭМИ). При его распространении и взаимодействии с веществом в одних процессах проявляются волновые свойства, а в других корпускулярные.

В волновой оптике светом называют электромагнитное излучение (ЭМИ), регистрируемое человеческим глазом и имеющее длину волны в видимом диапазоне от 0,4 мкм до 0,8 мкм. В процессе распространения происходит перенос энергии электромагнитного излучения. Длина волны ЭМИ  $\lambda$ , его частота  $\nu$  и скорость распространения  $v$  в любой среде связаны соотношением

$$\lambda \cdot \nu = v, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость электромагнитных волн (ЭМИ) в вакууме  $v = c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Величина скорости электромагнитных волн (ЭМИ) в вакууме измерена с весьма большой точностью:  $c = (299776 \pm 4) \text{ км/с}$ .

В квантовой механике свет рассматривается как **поток особых частиц — фотонов (квантов электромагнитного излучения)**, всегда движущихся со скоростью распространения ЭМИ. Фотоны не существуют в состоянии покоя, их масса и энергия покоя равны нулю.

Поэтому электромагнитное излучение, обладая одновременно корпускулярными и волновыми свойствами, обнаруживает определенные закономерности в их проявлении. Так, волновые свойства ЭМИ проявляются в таких явлениях как интерференция, дифракция, поляризация, а корпускулярные – при равновесном тепловом излучении, фотоэффекте и в эффекте Комптона.

В частности, согласно теории Эйнштейна, при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом монохроматическое

электромагнитное излучение с частотой  $\nu$  ведет себя как совокупность одинаковых **фотонов**.

**Энергия фотона  $E_\phi$**  определяется формулами

$$E_\phi = h\nu \text{ или } E_\phi = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $h$  – это постоянная Планка, равная  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

**Внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом)** называется испускание электронов веществом под воздействием электромагнитного излучения.

На использовании явления фотоэффекта основано действие фотоэлектронных приборов, получивших применение в различных областях науки и техники. **Фотоэлементами** называют устройства, работающие на основе фотоэффекта. Простейшим из них, использующим внешний фотоэффект, является **вакуумный фотоэлемент**. Он представляет собой стеклянный баллон, из которого удален воздух и в котором размещены два металлических электрода (анод и катод). Фотоэлемент включается в цепь батареи, ЭДС которой выбирается такой, чтобы обеспечить фототок насыщения. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света — сурьмяно-цезиевый.

Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта изображена на рис. 1.

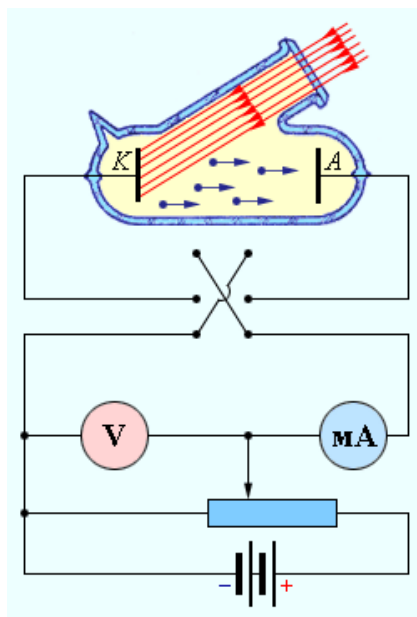


Рис. 1. Схема установки для изучения законов внешнего фотоэффекта.

Два металлических электрода (анод и катод), поверхность которых тщательно очищена, подключены к батарее так, что можно изменять знак (с помощью двойного ключа) и величину (используя реостат) подаваемого на электроды напряжения, величина которого измеряется вольтметром ( $V$ ). Один из электродов (катод  $K$ ) через кварцевое окошко освещается монохроматическим светом некоторой длины волны  $\lambda$ . Ток, возникающий в электрической цепи при освещении катода, измеряется включенным в цепь миллиамперметром ( $mA$ ). Этот ток называют **фототоком**.

На экспериментальной установке можно исследовать **вольтамперную характеристику фотоэлемента**, т.е. зависимость силы фототока  $I$ , образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием падающего на него света, от напряжения  $U$  между катодом и анодом.

Сила фототока  $I$  прямо пропорциональна числу фотоэлектронов  $N$ , долетающих до анода за единицу времени

$$I = \frac{Ne}{t}, \quad (3)$$

где  $N$  – число фотоэлектронов, достигших анода за время  $t$ ,  $e$  – модуль заряда электрона.

Подключим анод к положительной клемме, а катод к отрицательной клемме источника тока. Будем увеличивать напряжение между электродами. При одинаковых условиях освещения (при одинаковом световом потоке) зависимость силы фототока от напряжения имеет вид, изображенный на рис. 2. Кривые показывают, что с увеличением напряжения  $U$  фототок  $I$  постепенно нарастает (все большее число электронов достигает анода) и при достаточно больших положительных напряжениях на аноде  $A$  фототок достигает «насыщения».

Указанный характер кривой объясняется тем, что электроны из катода вылетают с различными скоростями, образуя «электронное облако» возле катода. При некотором значении напряжения  $U$  все электроны, вылетевшие из катода, достигают анода, т.е. «электронное облако» размывается и превращается в направленный от катода к аноду поток электронов, т.е. в этом случае имеет место **ток насыщения**  $I_{нас}$ . Измерения показали, что ток насыщения  $I_{нас}$  прямо пропорционален интенсивности падающего света – с увеличением светового потока ( $\Phi_2 > \Phi_1$ ) ток насыщения увеличивается ( $I_{2нас} > I_{1нас}$ ). Вольтамперная характеристика фотоэлемента, соответствующая двум различным освещенностям ( $\Phi_2 > \Phi_1$ ) катода (частота света в обоих случаях одинакова), приведена на рис. 2.

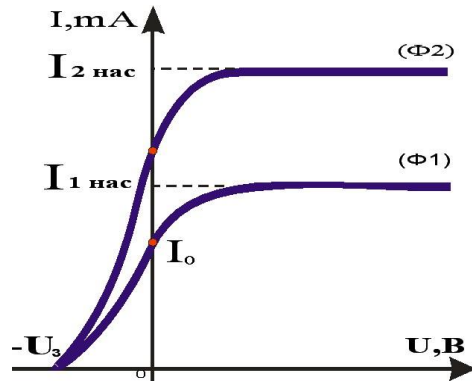


Рис. 2. Зависимость силы фототока от приложенного напряжения (вольтамперная характеристика).

При уменьшении напряжения от значения, соответствующего току насыщения, фототок уменьшается. Из вольтамперной характеристики следует, что при  $U_{\phi} = 0$  фототок не исчезает. Следовательно, электроны, выбитые светом из катода, имеют некоторую начальную скорость  $v$  и обладая отличной от нуля кинетической энергией, могут достигнуть анода без внешнего поля. Если подключить анод к отрицательной клемме, а катод к положительной клемме источника тока, то электрическое поле между анодом и катодом будет тормозить вылетевшие фотоэлектроны до полной остановки, а затем возвращать их к электроду обратно. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение** ( $U_{\text{зап}}$ ) – напряжение при котором ни один из фотоэлектронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью  $v_{\text{max}}$ , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $|eU_{\text{зап}}|$ . Измеряя задерживающее напряжение  $U_{\text{зап}}$  и применяя теорему о кинетической энергии, получим равенство

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{кин}} &= A_{\text{эл.поля}} \\ \Delta W_{\text{кин}} &= 0 - \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} \Rightarrow \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_{\text{зап}} \\ A_{\text{эл.поля}} &= -eU_{\text{зап}} \end{aligned} \quad (4)$$

для определения максимальной кинетической энергии фотоэлектронов.

По теории Эйнштейна, каждый фотон падающего света поглощается только одним электроном, поэтому число вылетевших из катода фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света, падающего на металл. Согласно закону сохранения энергии, энергия поглощенного фотона расходуется электроном на совершение электроном работы выхода  $A_{\text{вых}}$  из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad (5)$$

где  $h\nu$  – энергия падающего на металл фотона,  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из металла,  $\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия вылетевших фотоэлектронов. Уравнение (5) называют **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

Минимальная частота  $\nu_{\text{кр}}$  (или максимальная длина волны  $\lambda_{\text{кр}}$ ), при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия падающего на катод фотона равна работе выхода, называется **красной границей фотоэффекта** и определяется формулой

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \text{ или } \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}, \quad (6)$$

**Запирающим (или задерживающим) напряжением** называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода (4), и, применяя формулы (2) и (5), получаем выражение:

$$U_{\text{зан}} = \frac{\frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}}{e} = \frac{h\nu - A_{\text{вых}}}{e} = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A_{\text{вых}}}{e}. \quad (7)$$

#### 4. Методика виртуального эксперимента

В данной лабораторной работе используется компьютерная модель, основанная на методе изучения закономерностей внешнего фотоэффекта с применением установки, схематично изображенной на рис.1.

Для работы с моделями и входа в соответствующую программу на компьютере в аудитории следуйте инструкции, размещенной на стенде лаборатории.

Откройте компьютерную модель «**Фотоэффект**». Внимательно рассмотрите модель, рассмотрите все регуляторы и другие основные элементы. Выберите режим «**Установка**» (см. рис.3) и определите регулировки, изменяющие напряжение между анодом и фотокатодом, длину волны и мощность (иначе говоря, интенсивность света) падающего на фотоэлемент электромагнитного излучения.

Источником света (ЭМИ) служит лампа накаливания. Фотоэлемент и устройства, изменяющие длину волны и интенсивность ЭМИ, подающего на фотокатод, находятся в закрытом кожухе, расположенном напротив лампы. Компьютерная модель в правом нижнем окне фиксирует численные значения энергии фотона ( $h\nu$ ), падающего на фотокатод, и величину фототока  $I$ .

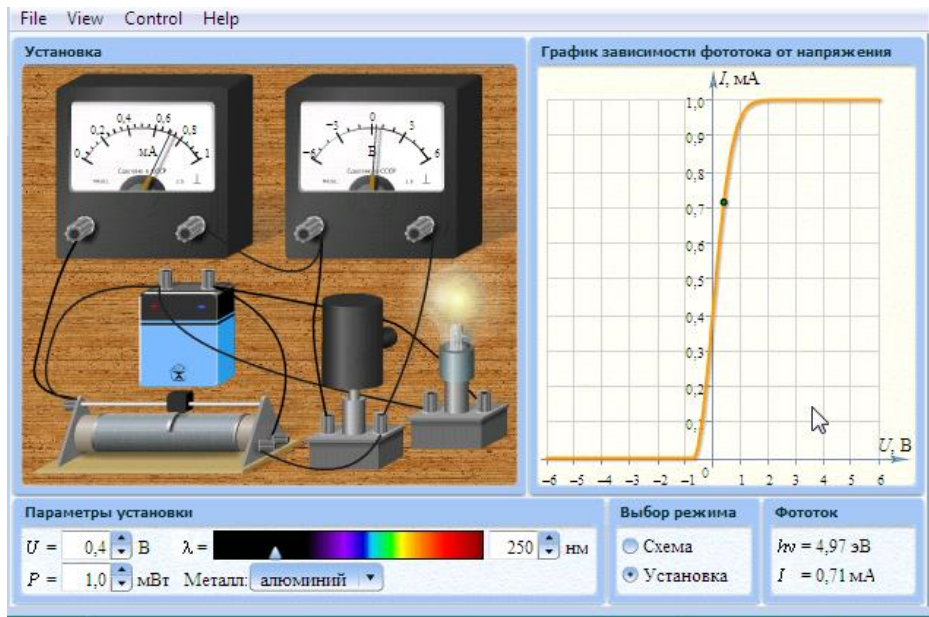


Рис.3. Диалоговое окно компьютерной модели «Фотоэффект» в режиме Установка.

Выберите режим «Схема» (рис.4). Установив с помощью регулятора любое значение длины волны падающего на фотокатод света, наблюдайте процессы движения электронов при разных значениях мощности излучения (при разных значениях светового потока). Затем проделайте те же наблюдения при определенной мощности для разных длин волн.

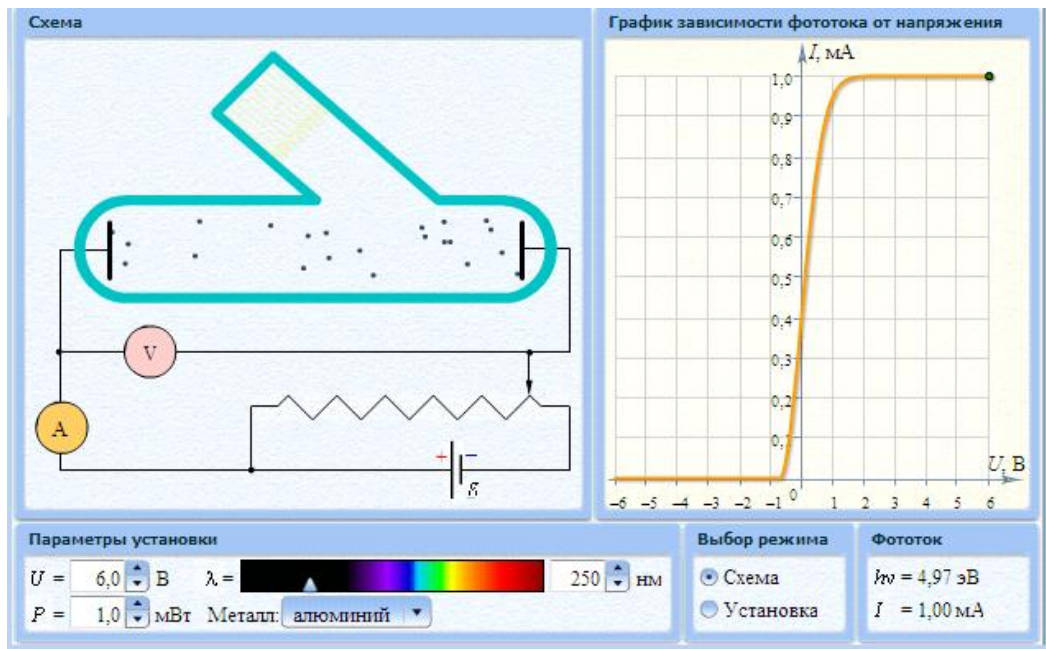


Рис.4. Диалоговое окно компьютерной модели «Фотоэффект» в режиме Схема.

Регуляторами интенсивности (мощности) облучения фотокатода светом и напряжения установите мощность на максимум и нулевое напряжение между анодом и фотокатодом. Отрегулируйте длину волны падающего на



фотокатод света до такой величины, чтобы фототок был отличен от нуля. Наблюдайте движение электронов в фотоэлементе, изменяя напряжение до запирающего фототока (показания тока  $I = 0$ ).

Для определения методики измерений запишем формулу (7) в виде

$$U_{\text{зап}} = \frac{hc}{e} \frac{1}{\lambda} - \frac{A_{\text{вых}}}{e} = \frac{hc}{e} \left( \frac{1}{\lambda} \right) + \text{const}, \quad (8)$$

где  $\text{const} = -\frac{A_{\text{вых}}}{e}$ . Из полученного равенства можно сделать вывод, что величина запирающего напряжения ( $U_{\text{зап}}$ ) линейно зависит от величины обратной длины волны  $\left( \frac{1}{\lambda} \right)$  падающего на фотокатод света  $U_{\text{зап}} = f\left( \frac{1}{\lambda} \right)$ .

Стоящая перед  $\left( \frac{1}{\lambda} \right)$  величина  $\frac{hc}{e}$  является коэффициентом наклона графика этой зависимости, что позволяет экспериментально определить величину **постоянной Планка  $h$** , воспользовавшись формулой

$$h = \frac{e \Delta(|U_{\text{зап}}|)}{c \Delta\left( \frac{1}{\lambda} \right)}, \quad (9)$$

в которой  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\Delta(|U_{\text{зап}}|)$  – приращение функции при соответствующем приращении аргумента  $\Delta\left( \frac{1}{\lambda} \right)$ .

### 5. Порядок выполнения работы

1. Для начала виртуального эксперимента «**Фотоэффект**» выберите режим «**Установка**».

2. Используя кнопки регуляторов, установите максимум интенсивности (мощности  $P$ ) облучения фотокатода, максимум напряжения  $U$  и минимальную длину волны  $\lambda$ . Выберите металл в соответствии с табл.1 для вашей бригады.

3. Постепенно увеличивая длину волны падающего на фотокатод света  $\lambda$ , наблюдайте поведение графика вольтамперной характеристики  $I(U)$ . Установите самую большую длину волны  $\lambda_{\text{max}}$ , при которой график еще не превращается в прямую горизонтальную линию с нулевым током. Полученная длина волны равна  $\lambda_{\text{кр}}$ , при которой фототок обращается в 0. Запишите в тетрадь значение длины волны красной границы фотоэффекта ( $\lambda_{\text{кр}}$ ).

4. Выберите режим «**Схема**».

5. Для определения связи запирающего напряжения с длиной волны падающего света необходимо сначала установить минимальную длину волны

(движок на спектре максимально влево) при максимальной мощности  $P$  облучения фотокатод (нажимая кнопку со стрелкой вверх на регуляторе мощности).

6. Затем установите значение запирающего напряжения  $U = U_{\text{зап}i}$  из табл.1 (в которой  $i$  – это номер измерения) для вашей бригады.

Таблица 1

**Значения запирающего напряжения (не перерисовывать).**

Бригада	1 и 6	2 и 7	3 и 8	4 и 9	5 и 10
Материал	алюминий	платина	медь	железо	никель
$U_{\text{зап}1}, \text{В}$	-0,5	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4
$U_{\text{зап}2}, \text{В}$	-1,5	-2,0	-1,6	-1,6	-1,6
$U_{\text{зап}3}, \text{В}$	-3,0	-4,0	-3,0	-3,0	-3,0
$U_{\text{зап}4}, \text{В}$	-4,5	-5,5	-4,5	-4,5	-4,5

7. Перемещая мышью метку на спектре вправо (или регулятором), установите такое максимальное значение длины волны  $\lambda = \lambda_1$ , при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении движения электронов вы видите, что электроны не долетают до анода, а движутся обратно к катоду), при этом амперметр показывает ток  $I = 0$ .

8. Значения  $\lambda_1$  и  $U_{\text{зап}1}$  запишите в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты измерений**

Номер измерения $i$	1	2	3	4
$U_{\text{зап} i}, \text{В}$				
$\lambda_i, \text{нм}$				
$1/\lambda_i, 10^6 \text{ м}^{-1}$				

9. Повторите измерения по п. 6 – 8 для трех других значений  $U_{\text{зап}}$  из табл.1 для вашей бригады, записывая результат измерений в табл.2.

**6. Обработка результатов измерений**

1. Вычислите численное значение работы выхода материала фотокатода, используя формулу (6) и экспериментально установленную длину волны красной границы фотоэффекта. Сравните вычисленное значение с величиной в табл. 3 (обратите внимание на размерность работы выхода в таблице).

2. Вычислите и запишите в табл. 2 обратные длины волн (обратите внимание на размерности величин в строках).

3. Постройте график зависимости модуля напряжения запираения ( $|U_{\text{зап}}|$ ) от обратной длины волны  $\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ , т.е.  $(|U_{\text{зап}}|) = f\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ .

4. Определите численное значение постоянной Планка, используя формулу (9) или (по указанию преподавателя) методику обработки результатов измерений на компьютере и сравните с табличным значением.

5. Запишите результаты и сделайте выводы.

Таблица 3

**Значения работы выхода для некоторых материалов**

Материал	железо	медь	платина	никель	алюминий
$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	4,4	4,5	5,4	4,6	4,3

### 7. Вопросы для подготовки к допуску

1. Что такое фотон? Напишите формулу вычисления энергии фотона.
2. Что называют внешним фотоэффектом? Перечислите условия, при которых возможен внешний фотоэффект.
3. Напишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта и поясните физический смысл входящих в него величин.
4. Что называют работой выхода и красной границей фотоэффекта?
5. Объясните принцип действия электрической схемы наблюдения внешнего фотоэффекта в данной работе.
6. Нарисуйте и поясните вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента. Отличаются ли вольтамперные характеристики различных материалов? (Ответ поясните).
7. Дайте определение фототока. От чего зависит величина фототока?
8. Поясните физический смысл запирающего (задерживающего) напряжения. Изменится ли величина запирающего напряжения, если: а) не меняя источник монохроматического излучения, изменить материал фотоэлемента? б) не меняя материал фотоэлемента, изменять мощность монохроматического излучения? (Ответ поясните).
9. Фотоэффект с металлической поверхности начинается при частоте падающего света  $\nu = 6 \cdot 10^{14}$  Гц. Определите работу выхода электрона из этого металла. Найдите длину волны  $\lambda$  света, вырывающего из этого металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов, равной  $U = 3$  В.

### 8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: издательский центр "Академия" (или другие издательства), 2012 – 2020 г.г.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц – Спб.: Лань (или другие издательства), 2012 – 2020 г.г.

*Ю.В. Тихомиров, В.А. Степанова*

## ФИЗИКА

*Учебно-методическое пособие*

В авторской редакции

Подписано в печать 24.11.2021 г.  
Формат 60x84/16 Печ. л. 0,75 Усл. печ. л. 0,7  
Заказ № 863/1004-УМП23 Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А  
Тел.: (495) 973-45-68  
E-mail: zakaz@itsbook.ru