

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емец Валерий Сергеевич  
Должность: Директор филиала  
Дата подписания: 18.05.2026 10:09:46  
Уникальный программный ключ:  
f2b8a1573c931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

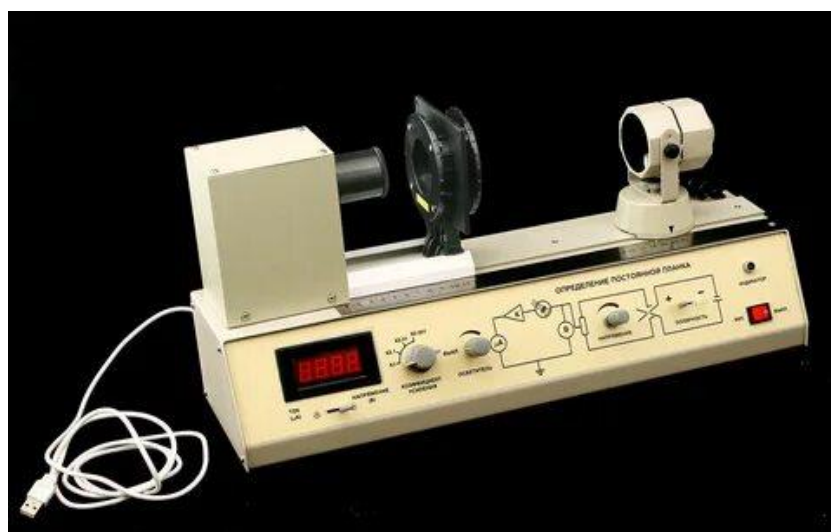
Рязанский институт (филиал)  
федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Московский политехнический университет»

Кафедра «Информатика и информационные технологии»

Мельник Г.И.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания по выполнению лабораторной работы



Рязань  
2024

**УДК 530**  
**ББК 22.3**  
**И-39**

**Мельник, Г.И.**

**И-39** Изучение закономерностей внешнего фотоэффекта: методические указания по выполнению лабораторной работы / Г.И. Мельник. – Рязань : Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2024. – 16 с.

Методические указания содержат описание лабораторной работы по квантовой оптике, в которой изложены теоретические сведения, методика выполнения лабораторной работы и описания экспериментальной установки, указаны порядок проведения эксперимента и обработки результатов измерений, а также контрольные вопросы и литература.

Настоящее пособие предназначено для студентов всех форм обучения, всех направлений и специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Печатается по решению методической комиссии Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

**УДК 530**  
**ББК 22.3**

© Г.И. Мельник, 2024  
© Рязанский институт (филиал)  
Московского политехнического  
университета, 2024

## Содержание

1 Общие сведения.....	4
2 Теоретическое введение .....	4
2.1 Виды фотоэффекта. Основные закономерности .....	4
2.2 Вольтамперная характеристика.....	6
3 Теория и методика эксперимента.....	8
3.1 Законы фотоэффекта.....	8
3.2 Трудности классической физики. Объяснение законов фотоэффекта	9
4 Описание экспериментальной установки.....	11
5 Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений.....	12
6 Контрольные вопросы.....	14
Библиографический список.....	15

# 1 Общие сведения

**Цель работы:** исследование закономерностей внешнего фотоэффекта путем снятия вольтамперных характеристик при различных значениях световых потоков и длин волн.

## **Приборы и принадлежности:**

1) фотоэлемент; 2) светофильтры; 3) реостат; 4) вольтметр; 5) миллиамперметр; 6) источник питания; 7) осветитель.

# 2 Теоретическое введение

## 2.1 Виды фотоэффекта. Основные закономерности

Различают три вида фотоэффекта:

– внешний фотоэффект заключается в вырывании электронов из вещества под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается преимущественно в проводниках;

– внутренний фотоэффект, при котором электроны под действием света теряют связь со своими атомами и молекулами, но остаются внутри вещества. Такой вид фотоэффекта возможен только в полупроводниках;

– вентильный фотоэффект заключается в возникновении фото-э.д.с. при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла без наличия внешнего электрического поля.

Ещё в 1887 году Генрих Герц обнаружил, что если осветить отрицательный электрод искрового разрядника ультрафиолетовым светом, то разряд возникает при меньшем напряжении.

Это явление, как показали опыты русского физика А. Г. Столетова (1888-1890 годы) обусловлено выбиванием под действием света отрицательных зарядов из катода разрядника.

На рисунке 1 показана схема опытов Столетова. Плоский конденсатор, одной из обкладок которого служила медная сетка **Cu**, а в качестве второй –

цинковая пластина **Zn**, был включен через гальванометр **G** в цепь аккумуляторной батареи.

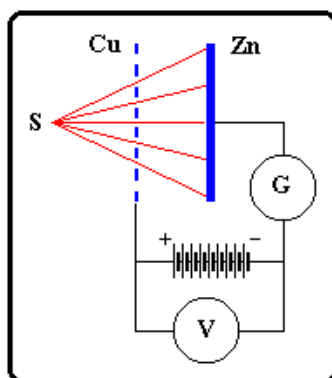


Рисунок 1 – Схема опытов Столетова

При освещении отрицательно заряженной пластины **Zn** светом от источника **S** в цепи возникал электрический ток, называемый *фототоком*. Сила фототока была пропорциональна освещённости пластины **Zn**. Освещение положительно заряженной обкладки из **Cu** не приводило к появлению фототока. Этим было экспериментально доказано, что под действием света металл теряет отрицательно заряженные частицы. Измерение удельного заряда этих частиц по их отклонению в магнитном поле показало, что это электроны ( $e/m = 1,759 \cdot 10^{11}$  К/кг).

На рисунке 2 изображена принципиальная схема, с помощью которой можно исследовать внешний фотоэффект. Для этого используется вакуумный фотоэлемент, который представляет собой стеклянный откачанный, например, сферический баллон, в центре которого расположен анод в виде кольца или пластинки. Часть внутренней поверхности баллона покрыта тонким слоем металла, который служит катодом. Освещаемый светом катод называется фотокатодом.

Между анодом и фото катодом источник тока создает электрическое поле. Так как электрическая цепь разомкнута, то при отсутствии света электрический ток через фотоэлемент не идет.

При освещении катода свет вырывает из него электроны, которые под действием сил электрического поля движутся к аноду. В цепи появляется электрический ток, называемый фототоком. Сила фототока измеряется гальванометром **G**, напряжение между анодом и фотокатодом – вольтметром **V**.

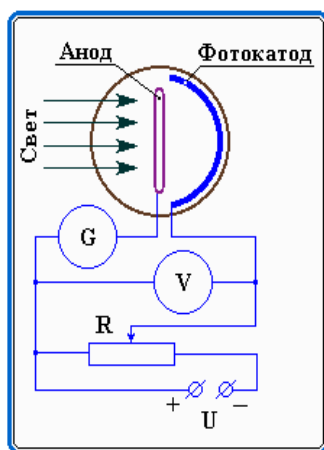


Рисунок 2 – Принципиальная схема исследования внешнего фотоэффекта

Электрон – это отрицательно заряженная частица. Следовательно, если из нейтрального тела выйдут несколько электронов, то заряд тела станет положительным. Вылетевшие электроны будут удерживаться около этого тела, притягиваясь к нему и отталкиваясь друг от друга, некоторые электроны будут возвращаться назад в вещество. Над поверхностью тела создаётся электронное облако. Вся система в целом (пластина и облако) будет электронейтральной, но при этом пластина заряжена положительным зарядом, а облако – отрицательным зарядом.

## 2.2 Вольтамперная характеристика

Изменяя напряжение потенциометром **R**, находят зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения  $U$  – вольтамперную характеристику.

На рисунке 3 изображена вольтамперная характеристика внешнего фотоэффекта.

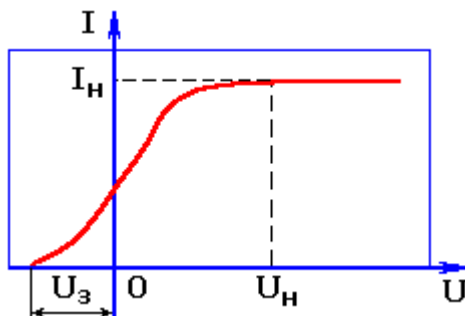


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика внешнего фотоэффекта

При  $U = 0$  между катодом и анодом электрического поля нет, но сила фототока всё равно не равна нулю. Это обусловлено тем, что электроны, вырванные светом из катода, имеют некоторую начальную скорость  $v$  (а значит, и кинетическую энергию), поэтому часть из них может достигать анода и при отсутствии электрического поля.

Если увеличивать напряжение между катодом и анодом (подавая отрицательный потенциал на катод, а на анод – положительный), будет увеличиваться сила тока. Это объясняется тем, что теперь электроны, которые при  $U = 0$  не достигали анода, под действием сил электрического поля притягиваются к аноду.

Из графика видно, что при некотором значении  $U = U_n$  сила фототока достигает наибольшего значения, получившего название тока насыщения  $I_n$ . Дальнейшее увеличение напряжения уже не вызывает роста силы тока. Это значит, что все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Если за единицу времени свет вырывает из фотокатода  $n$  электронов, то ток насыщения будет равен

$$I_n = e \cdot n, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона, Кл.

Если поменять полярность электродов, то есть подать на катод положительный потенциал, а на анод – отрицательный, то электрическое поле будет тормозить движение электронов от катода к аноду. За счет работы сил электрического поля ( $A_E = eU$ ) кинетическая энергия движущихся электронов будет уменьшаться.

Если первоначальная кинетическая энергия электрона  $W_k$  будет больше работы электрического поля ( $W_k > A_E$ ), электроны будут достигать анода, в цепи будет идти ток. При  $W_k \geq eU$  электроны анода не достигнут и ток прекратится.

*Наименьшее напряжение, при котором прекращается фототок, называется задерживающим* и обозначается  $U_3$ . При  $U = U_3$  даже самые быстрые электроны, имеющие максимальную скорость, не достигают анода. В этих условиях

$$eU_3 = \frac{m_e v^2}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, измеряя на опыте  $U_3$ , можно вычислить *максимальную кинетическую энергию* электронов, вылетающих из катода.

### 3 Теория и методика эксперимента

#### 3.1 Законы фотоэффекта

Опытным путем были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта.

**Первый закон.** При неизменном спектральном составе света, падающего на катод, сила тока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна световому потоку  $\Phi$ .

На рисунке 4 изображены вольтамперные характеристики при трёх различных значениях световых потоков и неизменном спектральном составе падающего на фотокатод света. Как видно из рисунка 4, для трех различных световых потоков  $\Phi$  частоты излучения остались неизменными.

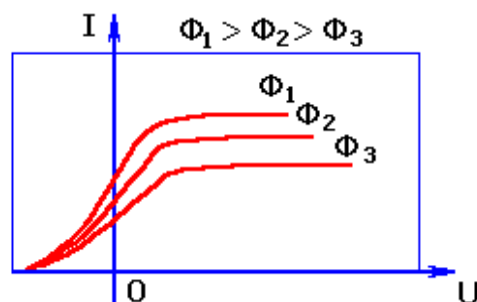


Рисунок 4 – Вольтамперные характеристики при различных значениях световых потоков

Следовательно, *одинаковы будут максимальная кинетическая энергия электронов и задерживающая разность потенциалов.*

**Второй закон.** Максимальная энергия фотоэлектронов линейно возрастает с ростом частоты света  $\nu$  и не зависит от светового потока. На рисунке 5 изображены вольтамперные характеристики внешнего фотоэффекта, снятые для различных значений частот падающего света при одинаковых световых потоках.

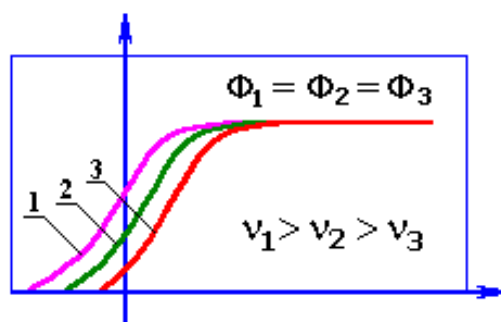


Рисунок 5 – Вольтамперные характеристики при различных значениях частоты падающего света

Следовательно, *максимальная кинетическая энергия электронов и задерживающая разность потенциалов* уменьшается с уменьшением частоты света.

**Третий закон.** Фотоэффект не возникает, если частота света меньше некоторой характерной для каждого металла величины  $\nu_{\min}$ , называемой красной границей фотоэффекта.

Если частота падающего на катод света будет больше или равна  $\nu_{\min}$ , то фотоэффект будет ( $\nu \geq \nu_{\min}$ ), если  $\nu < \nu_{\min}$ , то фотоэффекта не будет.

*Минимальной частоте  $\nu_{\min}$  соответствует максимальная длина волны  $\lambda_{\max}$*

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{\nu_{\min}}, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с).

### 3.2 Трудности классической физики. Объяснение законов фотоэффекта

Если свет – это электромагнитная волна, то согласно волновой теории энергия фотоэлектронов должна расти с ростом освещённости фотокатода.

Действительно, с точки зрения классической физики, если увеличение светового потока *эквивалентно* увеличению энергии, приносимой волной, и, если *работа выхода зависит только от свойств материала фотокатода, то* должна расти и кинетическая энергия электронов.

Экспериментально же установленный второй закон фотоэффекта говорил совершенно другое, что полностью противоречило имеющимся воззрениям на природу световых волн – *энергия фотоэлектронов менялась только при*

изменении длины волны светового потока, падающего на фотокатод, и не зависела от его освещённости.

Столкнувшись с фотоэффектом, классическая физика расписалась в своём бессилии. Окружающий мир оказался гораздо сложнее, чем было принято думать. Нужен был некто, кто смог бы по-другому взглянуть на происходящие в нём процессы. Роль этого "некто" взял на себя Альберт Эйнштейн.

Законы фотоэффекта были объяснены А. Эйнштейном на основе квантовой теории света. Согласно этой теории, *излучение* и *поглощение* света происходит порциями-квантами электромагнитных волн, названными фотонами. А. Эйнштейн предположил, что свет не только *излучается* и *поглощается*, но и *распространяется* в виде потока фотонов (квантов), энергия каждого из которых равна

$$E_{\phi} = h\nu, \quad (4)$$

где  $\nu$  – частота света;

$h$  – постоянная Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ , Дж·с).

Энергия  $E_{\phi}$  поглощённого фотона передается целиком *только одному электрону*. Часть этой энергии расходуется на совершение работы выхода электрона из вещества, оставшаяся часть сообщается электрону в виде *кинетической энергии*.

Если электрон не тратит энергию на неупругие столкновения в металле, то его кинетическая энергия при выходе из металла будет максимальна.

Исходя из закона сохранения энергии, можно записать соотношение, которое и было впоследствии названо **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**

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

где  $m_e$  – масса электрона,

$v$  – скорость электрона после его выхода из фотокатода;

$A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона (зависит только от природы вещества и от состояния его поверхности); для данного фотокатода  $A_{\text{вых}} = \text{const}$ .

Из уравнения Эйнштейна (5) следует, что максимальная кинетическая энергия вылетающих из катода электронов прямо пропорциональна частоте света (Второй закон фотоэффекта)

Из этого же уравнения (5) следует, что фотоэффект возможен, если энергия фотона  $h\nu$  больше или равна работе выхода электрона ( $h\nu \geq A_{\text{ВЫХ}}$ ). При условии  $h\nu < A_{\text{ВЫХ}}$  энергия фотона будет недостаточно для вырывания электрона из металла. Следовательно, минимальная энергия фотона  $h\nu_{\text{min}}$ , при которой еще возможен фотоэффект, равна работе выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$  ( $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{ВЫХ}}$ ), а красная граница фотоэффекта

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h}. \quad (6)$$

Красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона, то есть от природы вещества катода (**Третий закон фотоэффекта**)

Световой поток определяется числом фотонов, падающих на поверхность катода в единицу времени.

Следовательно, число вырванных в единицу времени электронов  $n$  (а значит и сила тока насыщения  $I_n$ ) прямо пропорционально световому потоку (**Первый закон фотоэффекта**).

## 4 Описание экспериментальной установки

В экспериментах используется стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых тщательно очищается. К электродам прикладывается некоторое напряжение  $U$ , полярность которого можно изменять.

Один из электродов (катод  $K$ ) через кварцевое окошко освещается монохроматическим светом некоторой длины волны  $\lambda$ . При неизменном световом потоке снимается зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения  $U$ . На рисунке 6 представлен вид виртуальной экспериментальной установки.

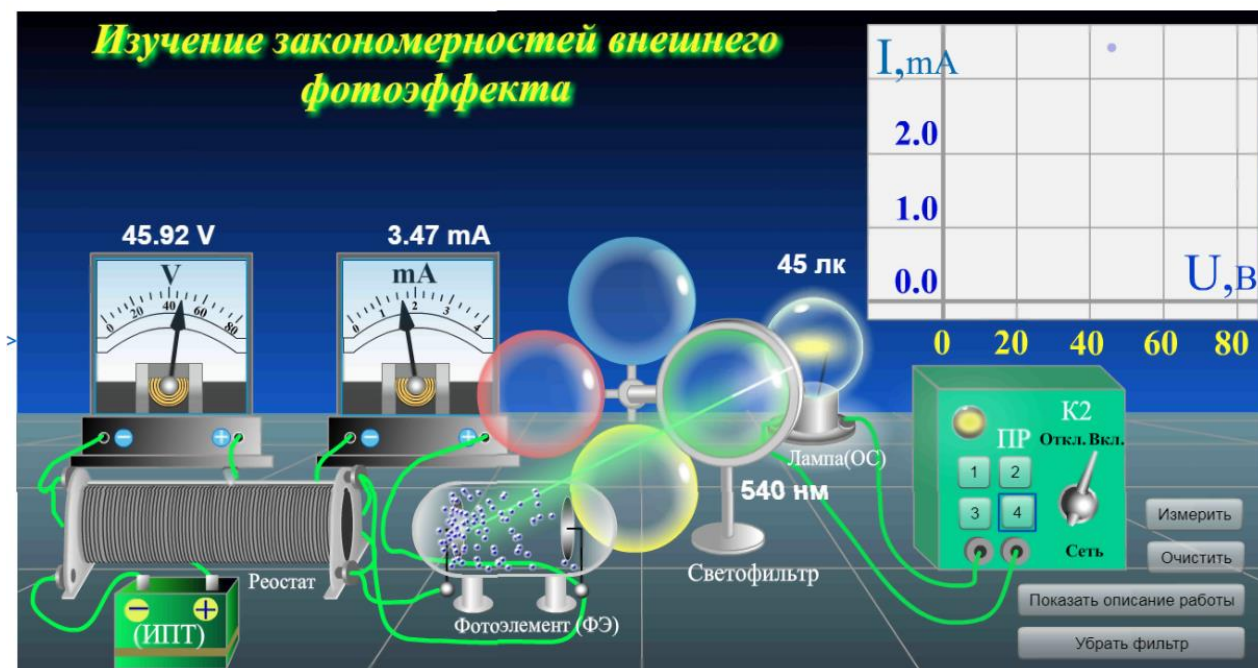


Рисунок 6 – Виртуальная экспериментальная установка для изучения закономерностей внешнего фотоэффекта

## 5 Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

### Опыт 1

1. Ключом К1 включить (мышкой) осветитель. Переключатель ПР установить в положение 1 (нажать на кнопку 1).

2. Сдвинуть ползунок реостата в крайнее левое положение.

3. Занести в таблицу 1 показания вольтметра и микроамперметра – измерения производятся щелчком мыши на кнопке ИЗМЕРИТЬ.

4. Перемещая ползунок реостата вправо, увеличивать напряжение и снимать показания через каждые 5 В. Полученные результаты занести в таблицу 1. После того, как с увеличением напряжения на фотоэлементе сила фототока перестанет увеличиваться, вернуть ползунок реостата в крайнее левое положение.

5. Поставив переключатель ПР в положение 2, изменить освещенность. Повторить измерения п.4, результаты занести в таблицу 1.

6. Поставив переключатель ПР в положение 3, а затем 4, проделать измерения при освещенностях фотокатода Е3 и Е4.

7. Построить вольт-амперные характеристики  $I=f(U)$ , используя данные таблицы 1. Провести анализ полученных ВАХ. Определить значение фототока насыщения  $I_{\text{фнас}}$ . Результат записать в отчет.

8. Построить график зависимости фототока насыщения от освещенности  $I_n=f(E)$ .

Таблица 1 – Экспериментальные данные опыта 1

$U, \text{В}$	5	10	15	....					...	60	$I_{\text{нас}}$
$I$ при 15 лк											
$I$ при 20 лк											
$I$ при 30 лк											
$I$ при 45 лк											

### Опыт 2

1. Для нахождения красной границы фотоэффекта установить светофильтры. При максимальной освещенности (ПР кнопка 4) установить поочередно синий, зеленый, желтый и красный светофильтры, найти величину фототока насыщения  $I_{\text{фнас}}$ . Полученные результаты занести в таблицу 2.

2. Провести анализ полученных ВАХ. Определить значение запирающего потенциала  $U_z$ , значение силы тока при  $U = 0$ . Рассчитать максимальную кинетическую энергию  $E_{\text{кин.мах}} = eU_z$ , которую приобретает электрон. Результаты записать в отчет.

3. Найти частоту, соответствующую красной границе фотоэффекта.

4. Обобщить полученные результаты и сделать выводы о справедливости законов внешнего фотоэлектрического эффекта.

Таблица 2 – Экспериментальные данные опыта 2

Цвет	Синий $\lambda = 440 \text{ нм}$	Зеленый $\lambda = 510 \text{ нм}$	Желтый $\lambda = 570 \text{ нм}$	Красный $\lambda = 710 \text{ нм}$
$I_{\text{нас}}$				

## 6 Контрольные вопросы

1. Дайте определение внешнего фотоэлектрического эффекта.
2. Дайте определение фототока насыщения.
3. Дайте формулировку законов внешнего фотоэффекта.
4. Дайте определение "красной границы" фотоэффекта.
5. Запишите формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
6. От чего зависит число фотоэлектронов, вырывааемых в единицу времени с поверхности катода при фотоэффекте?
7. От чего зависит число скорость фотоэлектронов?
8. От чего зависит число величина красной границы фотоэффекта?
9. На разные металлы падают фотоны одинаковой частоты. Одинакова ли скорость фотоэлектронов, вылетевших из металлов?
10. Начертите график зависимости фототока от напряжения между электродами для излучения, соответствующего красной границе фотоэффекта.
11. Начертите график зависимости фототока от напряжения между электродами для излучения, имеющего в два раза большую частоту.
12. На рисунке 7 показаны графики зависимости (1, 2) задерживающего напряжения от частоты света для двух различных материалов фотокатода. Какой из материалов имеет большую работу выхода? Почему зависимость линейная? Чему равен тангенс угла наклона?

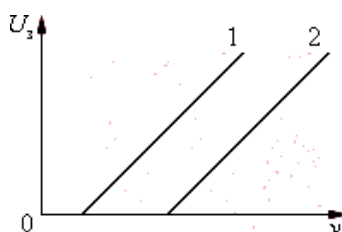


Рисунок 7 – К вопросу 12

13. Почему существование красной границы фотоэффекта говорит в пользу корпускулярной теории света и против волновой?
14. Почему выход фотоэлектронов при возникновении фотоэффекта не зависит от освещенности металла?

## Библиографический список

1 Оселедчик, Ю.С. Физика: Физика. Модульный курс для технических вузов: учеб. пособие для бакалавров / Ю.С. Оселедчик, П.И. Самойленко. – Москва: Изд-во Юрайт, 2013. – 526 с.

2 Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. Рек. МО. 17-е изд., стер. / Т.И. Трофимова. – Москва: Издат. центр «Академия»: Высш. шк., 2010. – 560 с.

3 Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для вузов / И.В. Савельев. – Москва: ООО «Изд-во АСТ», 2007. – 256 с.

4 Детлаф, А.А. Курс физики: учеб. пособие для вузов. Рек. МО. – 6-е изд., стер. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – Москва: Издат. центр «Академия»: 2009. – 720 с.

Учебное издание

**Мельник** Галина Исааковна

## **ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА**

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Подписано в печать \_\_\_\_\_. Тираж 5 экз.

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета  
390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53