



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

# Лабораторная работа О-30

## «Определение постоянной Планка»

по дисциплине

### «Физика»

Авторы  
Беликова Т. С.,  
Мардасова И. В.,  
Шкиль Т. В.

Ростов-на-Дону, 2020

## Аннотация

Лабораторная работа содержит краткую теорию, описание установки и методику экспериментального определения постоянной Планка.

Работа предназначена для студентов инженерных специальностей всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел «Оптика и атомная физика»).

## Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Беликова Т.С.,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Мардасова И.В.,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»  
Шкиль Т.В



## Оглавление

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Лабораторная работа О-30 .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Краткая теория .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы .....</b> | <b>8</b>  |
| <b>Порядок выполнения работы .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>Контрольные вопросы .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>Список литературы .....</b>   | <b>16</b> |

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА О-30

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА**

**Цель работы:** определение постоянной Планка и максимальной скорости фотоэлектронов с использованием внешнего фотоэффекта.

**Оборудование:** оптическая скамья, ртутная лампа с блоком питания, фотоэлемент в защитном кожухе, диафрагма со щелью, собирающая линза, дифракционная решетка, светофильтры, универсальный усилитель, цифровой вольтметр.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

*Внешним фотоэффектом* называется явление испускания электронов веществом под действием света.

Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются *фотоэлектронами*; электрический ток, возникающий при упорядоченном движении фотоэлектронов, называется *фототоком*.

Фундаментальные исследования фотоэффекта проведены русским ученым А.Г.Столетовым в 1888-1889 г.г.

Принципиальная схема установки для изучения внешнего фотоэффекта показана на рис. 1. Свет падает через кварцевое окошко на поверхность катода  $K$ , находящегося внутри вакуумной трубки. *Вольтамперная характеристика фотоэффекта* – зависимость фототока  $I$  от напряжения  $U$  между катодом  $K$  и анодом  $A$  – приведена на рис. 2. Две кривые соответствуют двум различным значениям светового потока  $\Phi$ , падающего на катод при одинаковой частоте света. Световой поток определяется как мощность оптического излучения и фактически равен количеству энергии, падающей на данную поверхность за единицу времени.

Максимальное значение фототока – *ток насыщения*  $I_n$  – соответствует такому значению напряжения, при котором все электроны, выбиваемые из катода, достигают анода,

$$I_n = e \cdot n,$$

где  $n$  – число фотоэлектронов, испускаемых катодом за 1 с,

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона.

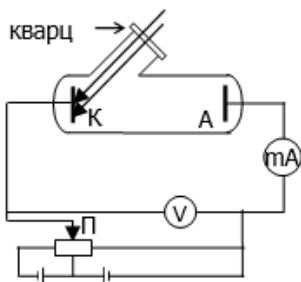


Рис. 1

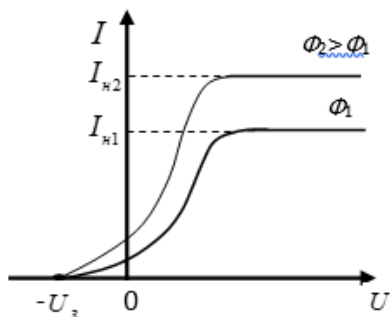


Рис. 2

Как видно из рис. 2, даже при отсутствии напряжения ( $U = 0$ ) фототок не исчезает, т.е. некоторые электроны достигают анода без внешнего поля, за счет своей кинетической энергии. Чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение  $U_3$ . Когда работа электрических сил, тормозящих движение фотоэлектронов на промежутке катод-анод, станет равна кинетической энергии электронов, ни один электрон не сможет преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода. Следовательно,

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

где  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса электрона,  $v_{\max}$  – его максимальная скорость.

Опытным путем были установлены *законы фотоэффекта*.

1 (*закон Столетова*): сила тока насыщения пропорциональна падающему световому потоку,

$$I_n = \gamma \cdot \Phi,$$

где  $\gamma$  – чувствительность катода.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$ , при которой возникает фотоэффект ( $\nu_0$  зависит от вещества и состояния поверхности катода).

4. Фотоэффект практически безинерционен.

А. Эйнштейн в 1905 г. объяснил закономерности фотоэффекта на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта.

Согласно Эйнштейну, свет частотой  $\nu$  не только испускается, как предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых

$$\varepsilon = h\nu,$$

где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Квант электромагнитного излучения получил название *фотона*.

Согласно Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Если электрон освобождается светом не у самой поверхности, а на некоторой глубине, то часть энергии может быть потеряна вследствие случайных столкновений в веществе, остаток энергии образует кинетическую энергию фотоэлектрона

$$E_{\kappa} = \frac{m\nu^2}{2}.$$

По закону сохранения энергии при отсутствии потерь энергия падающего фотона  $h\nu$  расходуется на совершение электроном работы выхода  $A$  из металла и на сообщение фотоэлектрону кинетической энергии:

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{max}^2}{2}. \quad (2)$$

Выражение (2) называется *уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта*. Фотоэффект и работа выхода  $A$  в сильной степени зависят от состояния поверхности металла (окислов, адсорбированных веществ).

Используя соотношение (1), выражение (2) можно записать в виде

$$h\nu = A + eU_3. \quad (3)$$

#### *Объяснение законов фотоэффекта на основе квантовой теории*

1. По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном, поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропор-

ционально числу падающих на поверхность квантов. Световой поток  $\Phi$  определяется количеством квантов света, падающих на поверхность в единицу времени. В соответствии с этим, ток насыщения  $I_n$  пропорционален падающему световому потоку:

$$I_n \sim \Phi, \quad I_n = \gamma \Phi,$$

т.е. подтверждается первая закономерность фотоэффекта.

2. Как следует из уравнения (2),

$$\frac{m v_{max}^2}{2} = h \nu - A, \quad (4)$$

т.е. максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Фотоэффект возникнет, если энергии фотона  $h \nu_0$ , переданной электрону, достаточно для совершения работы выхода  $A$  из металла:

$$h \nu_0 = A \Rightarrow \nu_0 = \frac{A}{h}.$$

Следовательно, для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$ , при которой возникает фотоэффект.

Поскольку каждой частоте соответствует определенная длина волны, существует волновая граница фотоэффекта  $\lambda_0$ .

$$\text{Т.к. } \nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}, \quad \frac{c}{\lambda_0} = \frac{A}{h} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{ch}{A},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме,  $\lambda_0$  – максимальная длина волны, при которой еще возможен фотоэффект, также называемая «красной границей».

4. Безинерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Устройства, действие которых основано на использовании фотоэффекта, называются *фотоэлементами*.

*Вакуумный фотоэлемент* представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух; часть его внутренней поверхности покрыта слоем металла (фотокатод). Анод – металлическое кольцо или сетка.

Для увеличения чувствительности используют *фотоэлементы, наполненные инертным газом*, обычно аргоном при давлении  $p = 0,01 - 0,1 \text{ мм.рт.ст.}$

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Общий вид установки и ее оптическая схема представлены на рисунках 3 и 4; цифры на обоих рисунках обозначают одни и те же элементы установки. На одном конце оптической скамьи 1 установлена ртутная лампа 2, на небольшом расстоянии от которой (11 см от края оптической скамьи) располагается диафрагма с щелью 3; на расстоянии  $\sim 10$  см от щели помещается собирающая линза 4 с фокусным расстоянием  $F = 10$  см. При таком положении щель находится в фокусе линзы, поэтому за линзой световые лучи идут параллельным пучком и попадают на дифракционную решетку 5. Дифракционная решетка в специальном держателе закреплена на поворотном шарнире, который позволяет осуществлять поворот части оптической скамьи на угол  $\varphi$ , обеспечивая таким образом положение фотоэлемента 7 при разных углах наблюдения  $\varphi$ . На входное окно фотоэлемента помещается специальный держатель со сменными светофильтрами 6. В работе используются два светофильтра: фиолетовый ( $\lambda_{\phi} = 436$  нм) и зеленый ( $\lambda_{\phi} = 524$  нм). Высоковакуумный фотоэлемент представляет собой ячейку, половина внутренней части которой покрыта слоем соединения  $CsSb$  (красная граница  $\lambda_0 = 670$  нм), который является катодом; напротив катода расположен анод. В ячейке имеется прозрачное входное отверстие, которое в ходе эксперимента может закрываться шторкой.



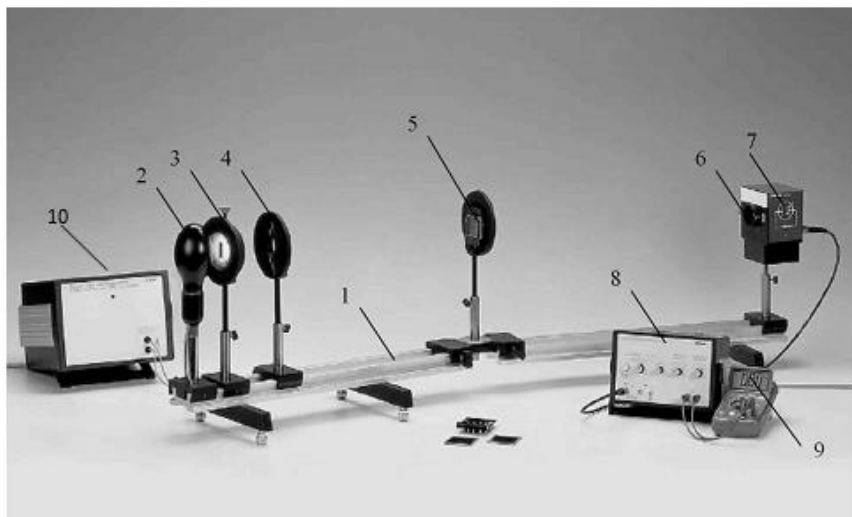


Рис. 3

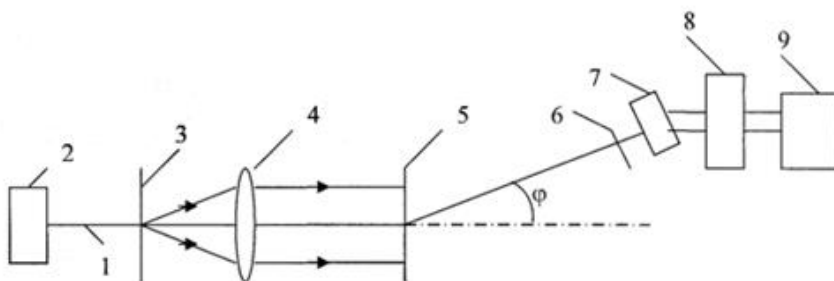


Рис. 4

Электрические выводы катода и анода специальным экранированным кабелем соединяются с входом универсального измерительного усилителя 8, выход которого подключен к цифровому вольтметру 9 (рабочий режим вольтметра – 20 В постоянного напряжения).

Питание ртутной лампы осуществляется от источника 10.

Универсальный усилитель (рис. 5) используется для усиления измеряемых сигналов и имеет два режима работы: «Electrometer» (для высокоомных входных сигналов) и «Low Drift» (для регистрации малых сигналов и их усиления на несколько порядков).

Физика

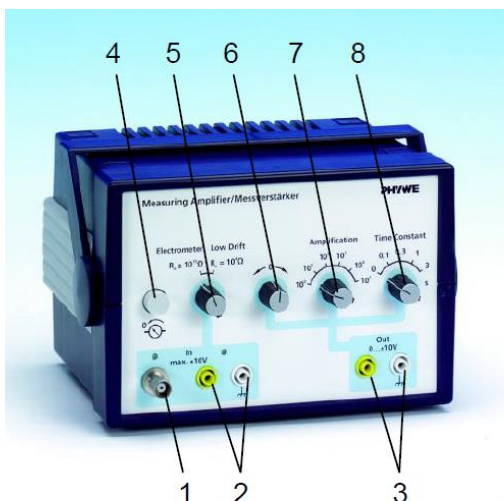


Рис. 5

Режим работы определяется положением переключателя 5. При установке переключателя в положение «Electrometer» загорается соответствующий светодиод. Разъем 1 – входной разъем для данного режима. При этом входное сопротивление усилителя очень большое ( $R \geq 10^{13}$  Ом), поэтому можно считать, что электрическая цепь, включающая катод и анод, практически разомкнута. Переключатель выбора коэффициента усиления 7 ставится в положение « $10^0$ » (т.е. коэффициент усиления равен 1), переключатель выбора постоянной времени фильтра нижних частот 8 – в положение «0».

При нажатии кнопки 4 срабатывает разрядный ключ и входной конденсатор усилителя разряжается через защитный резистор. При этом входное окно фотоэлемента должно быть закрыто шторкой, а нулевое значение входного напряжения контролируется вольтметром при помощи рукоятки 6.

Пара выходных гнезд 3 служит для подключения цифрового вольтметра.

Пара входных гнезд 2 предназначена для работы в режиме «Low Drift» и в данной лабораторной работе не используются.

Для определения постоянной Планка используется метод задерживающего напряжения. В данной работе катод и анод максимально изолиро-

ваны друг от друга, поэтому вылетающие из катода фотоэлектроны накапливаются на аноде, заряжая его отрицательно, а катод, теряя электроны, заряжается положительно. Между катодом и анодом возникает электрическое поле, тормозящее движение электронов. Когда работа электрических сил  $A_{эл} = eU_3$  на промежутке анод-катод станет равной максимальной кинетической энергии фотоэлектронов, ни один из них не сможет достигнуть анода, а будет отброшен назад к катоду; дальнейшее накопление электрических зарядов на аноде и катоде прекращается.

$$eU_3 = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где  $U_3$  – задерживающее напряжение, установившееся между анодом и катодом, которое фиксируется вольтметром.

Поскольку для данного катода работа выхода электрона из металла  $A$  является постоянной величиной, при поочередном облучении фотоэлемента светом различных известных частот  $\nu_1$  и  $\nu_2$  выполняются соотношения

$$h\nu_1 = A + eU_1,$$

$$h\nu_2 = A + eU_2.$$

Вычитая из первого соотношения второе и проделав алгебраические преобразования, получаем формулу для определения  $h$ :

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \nu_2}, \quad (5)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — значения задерживающих напряжений, измеренные вольтметром.

Спектр излучения ртутной лампы имеет дискретный (линейчатый) характер и состоит из нескольких спектральных линий разной частоты и интенсивности, часть которых располагается в ультрафиолетовой области. Для спектрального разделения света используется дифракционная решетка. При падении излучения на дифракционную решетку свет, имеющий разные длины волн  $\lambda$ , распространяется далее под разными углами согласно соотношению:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda ,$$

где  $m = 0, 1, 2 \dots$  – порядок максимума,  $d$  – период решетки,  $\varphi$  – угол дифракции, т.е. угол наблюдения света в спектре  $m$ -го порядка.

Данное соотношение определяет положения главных максимумов интенсивности света, между которыми имеются небольшие по интенсивности дополнительные максимумы.

На главный максимум для длины волны  $\lambda$  могут накладываться дополнительные максимумы от более коротких длин волн, что может внести погрешность в результат эксперимента. Сменные светофильтры, устанавливаемые перед фотоэлементом, частично уменьшают влияние дополнительных дифракционных максимумов от высокочастотной части излучения ртутной лампы.

Оптическая схема и ширина щели должны быть отрегулированы таким образом, чтобы ширина отдельной спектральной линии на окне фотоэлемента была равна примерно 1 см.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Внимание!** При проведении эксперимента необходимо избегать прямого попадания излучения ртутной лампы в глаза. Ртутная лампа достигает максимальной яркости свечения после прогрева в течение 5 минут; усилитель будет готов к работе через 10 минут после включения.

1. Включить ртутную лампу и усилитель.
2. Окно фотоэлемента должно быть закрыто шторкой. Установить угол  $\varphi$  равным нулю. Поместить перед фотоэлементом белый лист бумаги и убедиться, что светлое изображение щели четкое, попадает в окно фотоэлемента и имеет ширину 1 см.
3. Медленно увеличивая угол  $\varphi$ , совместить с окном фотоэлемента сначала фиолетовую полосу в спектре 1-го порядка, а затем зеленую.

**Внимание!** При правильной настройке установки зеленая и желтая полосы должны располагаться рядом без разделения их черным промежутком и не накладываться друг на друга. В противном случае ширину щели нужно изменить.

4. Через 10 минут после включения усилителя установить перед фотоэлементом зеленый светофильтр, совместить центр зеленой полосы с центром входного окна фотоэлемента.
5. Включить цифровой вольтметр.
6. Нажать серую колонку 4 на передней панели усилителя; при этом разрядится входной конденсатор усилителя и все предыдущие показания вольтметра будут обнулены; проверить это по вольтметру.
7. Отпустить кнопку 4, открыть окно фотоэлемента и подождать, пока показания вольтметра перестанут расти.
8. Записать показания вольтметра в таблицу 1.
9. Снять зеленый светофильтр и установить на его место фиолетовый.
10. Медленно изменяя угол  $\varphi$ , совместить правый край фиолетовой полосы с центром входного окна; именно такое положение оказалось оптимальным при снятии данных для фиолетовой составляющей.
11. Закрывать окно фотоэлемента и повторить п.п. 6-8.
12. Закрывать окно фотоэлемента и повторить измерения задерживающих напряжений для зеленого и фиолетового цветов еще по два раза, изме-

няя перед каждым измерением угол  $\varphi$  и обнуляя показания вольтметра (т.е. п.п. 6-8).

**Задание 1.** *Определение постоянной Планка.*

1. По известной длине волны  $\lambda$ , пропускаемой светофильтром, рассчитать соответствующую частоту  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  и занести ее в таблицу 1.

2. Рассчитать по формуле (5) и занести в таблицу 1 значения постоянной Планка для трех строчек таблицы 1:

$$h = \frac{e(U_{\phi} - U_3)}{\nu_{\phi} - \nu_3}.$$

**Таблица 1**

| $\lambda_{\phi} = 4,36 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \nu_{\phi} = \text{Гц}, \lambda_3 = 5,24 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \nu_3 = \text{Гц}$ |                      |                 |   |  |            |              |
|--|----------------------|-----------------|---|--|------------|--------------|
| №  | $U_{\phi}, \text{В}$ | $U_3, \text{В}$ | $h, \text{Дж} \cdot \text{с} \times 10^{-34}$ | $\Delta h, \text{Дж} \cdot \text{с} \times 10^{-34}$ | $\delta h$ | $\delta h_m$ |
| 1  |                      |                 |   |  | X          | X            |
| 2  |                      |                 |   |  |            |              |
| 3  |                      |                 |   |  |            |              |
| Среднее значение   |                      |                 |   |  |            |              |

3. Вычислить и записать в таблицу 1

$$\langle h \rangle = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}, \quad \Delta h_i = |\langle h \rangle - h_i|,$$

$$\langle \Delta h \rangle = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3}{3}, \quad \delta h = \frac{\langle \Delta h \rangle}{\langle h \rangle}.$$

4. Записать окончательный результат в виде  $h = \langle h \rangle \pm \langle \Delta h \rangle$ .

5. Сравнить рассчитанное значение постоянной Планка с теоретическим:

$$\delta h_m = \frac{|h_{\text{теор}} - \langle h \rangle|}{h_{\text{теор}}}.$$

**Задание 2.** *Определение максимальной скорости фотоэлектронов.*

Как следует из соотношения (1), максимальную скорость можно рассчитать по формуле

$$\nu = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (6)$$

1. Перенести из таблицы 1 в таблицу 2 значения задерживающих напряжений  $U_\phi$  и  $U_3$ .
2. Рассчитать по формуле (6) значения  $\nu$ , результаты записать в таблицу 2.

**Таблица 2**

| №                | $U_\phi, B$ | $\nu_\phi, м/с$ | $\Delta \nu_\phi, м/с$ | $\delta \nu_\phi$ | $U_3, B$ | $\nu_3, м/с$ | $\Delta \nu_3, м/с$ | $\delta \nu_3$ |
|------------------|-------------|-----------------|------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------------|----------------|
| 1                |             |                 |                        | X                 |          |              |                     | X              |
| 2                |             |                 |                        |                   |          |              |                     |                |
| 3                |             |                 |                        |                   |          |              |                     |                |
| Среднее значение |             |                 |                        | X                 |          |              |                     |                |

3. Вычислить и записать в таблицу 2

$$\langle \nu \rangle = \frac{\nu_1 + \nu_2 + \nu_3}{3}, \quad \Delta \nu_i = |\langle \nu \rangle - \nu_i|,$$

$$\langle \Delta \nu \rangle = \frac{\Delta \nu_1 + \Delta \nu_2 + \Delta \nu_3}{3}, \quad \delta \nu = \frac{\langle \Delta \nu \rangle}{\langle \nu \rangle}.$$

4. Записать окончательный результат в виде:

$$\nu_\phi = \langle \nu_\phi \rangle \pm \langle \Delta \nu_\phi \rangle,$$

$$\nu_3 = \langle \nu_3 \rangle \pm \langle \Delta \nu_3 \rangle.$$

5. Используя второй закон фотоэффекта (см. выражение (4)), пояснить, почему  $\langle \nu_\phi \rangle$  и  $\langle \nu_3 \rangle$  значительно отличаются между собой?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой внешний фотоэффект?
2. Что такое фотоэлектроны? Фототок?
3. Что называется вольтамперной характеристикой фотоэффекта? Изобразите ее графически.
4. Что такое ток насыщения?
5. Что представляет собой задерживающее напряжение  $U_3$ ? Запишите формулу, выражающую связь  $U_3$  с максимальной кинетической энергией фотоэлектронов.
6. В чем суть гипотезы о квантовой природе света?
7. Что представляет собой фотон? Как выражается его энергия?
8. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и поясните его физический смысл.
9. Запишите и сформулируйте законы фотоэффекта. Что такое «красная граница» фотоэффекта?
10. Опишите устройство и принцип действия вакуумного фотоэлемента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т. И. Трофимова, «Курс физики», – М: Академия, 2013 г.