# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4-7(Н): ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Студент:_____ группа:_____

Допуск_____Выполнение_____Защита_____

**Цель работы:** Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента. Определение работы выхода электронов из вещества $A_{вых}$, красной границы фотоэффекта $\nu_{кр}$ и постоянной Планка $h$ графическим методом.

**Приборы и принадлежности:** вакуумный фотоэлемент, галогеновая лампа, набор светофильтров, электронный блок приборов (включает микроамперметр, вольтметр, источник питания).

## Описание выполнения работы

В первой части лабораторной работы необходимо экспериментальным путём построить вольт-амперную характеристику вакуумного фотоэлемента, сравнить её с теоретической кривой и при защите лабораторной работы объяснить вид этой кривой.

Во второй части работы необходимо графическим методом определить работу выхода электронов из вещества $A_{вых}$, красной границы фотоэффекта $\nu_{кр}$ и постоянную Планка $h$.

Экспериментальная зависимость силы тока $I$, текущего через вакуумный фотоэлемент, от напряжения $U$ на его электродах (вольт-амперная характеристика) приведена на рис. 1.

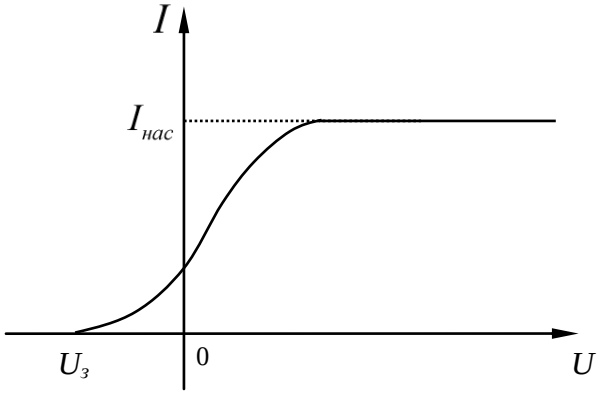



**Рис. 1** Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Из рис.1 видно, что при подаче на фотоэлемент отрицательного напряжения, фототок постепенно убывает, обращаясь в ноль при некотором напряжении $U_з$, называемом ***запирающим*** или ***задерживающим*** (см. рис. 1).

Максимальная начальная скорость вылетающих из вещества фотоэлектронов $v_{\max}$ связана с задерживающей разностью потенциалов $U_з$ соотношением

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_з, \qquad (1)$$

где $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\,Кл$ - заряд электрона, $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,кг$ – масса электрона.

С учетом (1) уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта $h\nu = A_{вых} + \frac{m v_{\max}^2}{2}$ можно записать в виде

$$h\nu = A_{вых} + eU_з. \qquad (2)$$

Приведём уравнение (2) к виду удобному для построения графика по результатам эксперимента и для применения метода наименьших квадратов (смотри лабораторную работу 0-1):

$$U_з = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{вых}}{e}. \qquad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение прямой $y = ax + b$, где $y = U_з$; $x = \nu$; $a = \frac{h}{e}$; $b = -\frac{A_{вых}}{e}$.

Таким образом, из уравнения (3) следует, что зависимость задерживающей разности потенциалов $U_з$ от частоты $\nu$ падающего на вещество света, есть уравнение прямой линии (см. рис.2).

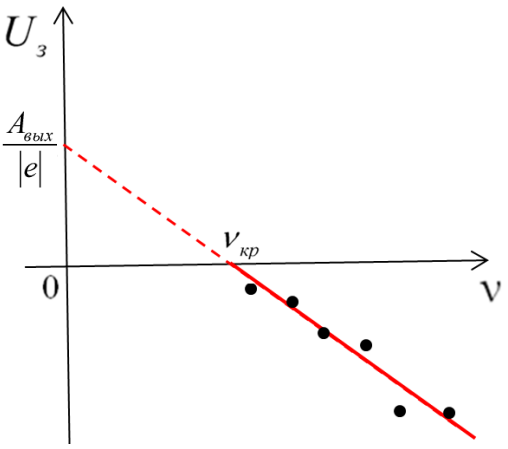



**Рис. 2** Зависимость задерживающей разности потенциалов $U_з$ от частоты $\nu$ падающего на катод света.

- экспериментальная кривая
- экпериментальные точки

Из рис. 2 видно, что на оси ординат $U_з$ при $\nu = 0$ эта прямая отсекает отрезок равный $\frac{A_{вых}}{|e|}$, где $|e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,Кл$ - модуль заряда электрона. Таким образом, построив по результатам измерений в определённом масштабе график зависимости средних значений задерживающего потенциала $U_з$ от частоты падающего на вещество света $\nu$, и, определив из него величину $U_з = \frac{A_{вых}}{|e|}$, можно найти работу выхода электронов из вещества:

$$A_{вых} = U_з \cdot |e|,$$

где $U_з$ - задерживающий потенциал, полученный из графика.

Постоянную Планка $h$ можно определить из связи работы выхода электронов из вещества $A_{вых}$ и красной границы фотоэффекта $\nu_{кр}$:

$$\nu_{кр} = \frac{A_{вых}}{h}.$$

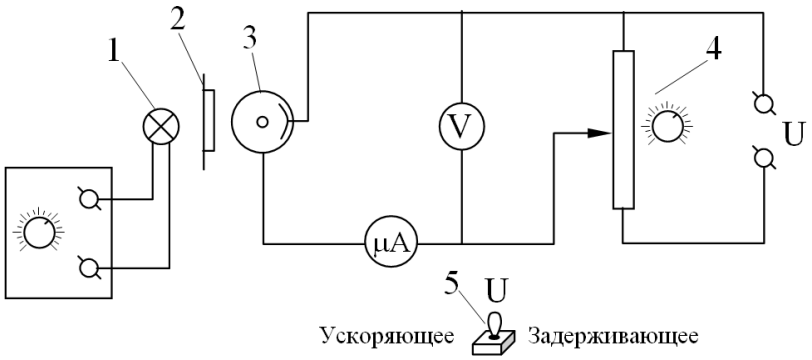
Из рис. 2 видно, что полученная нами прямая, пересекает ось абсцисс ν в точке, которая соответствует ***красной границе фотоэффекта*** $\nu_{кр}$. Таким образом, определив по графику $\nu_{кр}$, найдём постоянную Планка:

$$h = \frac{A_{вых}}{\nu_{кр}},$$

где $A_{вых}$ - полученное графически значение работы выхода электронов из вещества.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Фотоэффект изучают на установке, состоящей из фотоэлемента **3** и лампы накаливания **1**, размещаемых на оптической скамье, а также цифровых микроамперметра и вольтметра, конструктивно объединенных вместе с реостатом в один электронный блок приборов (см. рис. 3).




1 – лампа накаливания; 2 – светофильтры в оправе; 3 – фотоэлемент; 4 – реостат; 5 – переключатель полярности.

**Рис. 3**

Вакуумный фотоэлемент **3** заключен в защитный кожух с окном и представляет собой стеклянный баллон, половина которого изнутри покрыта тонким слоем щелочного металла, который является катодом фотоэлемента.

Источником света является галогеновая лампа накаливания **1**, напряжение на которой может регулироваться ручкой, размещенной в левой части лицевой панели электронного блока. Монохроматическое излучение получают с помощью светофильтров, закрепленных во вращающейся оправе **2** (длина волны λ пропускания светофильтров указаны на самих светофильтрах). Фототок измеряют цифровым микроамперметром. Напряжение на фотоэлементе может изменяться вращением ручки реостата **4** и измеряется цифровым вольтметром. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжений служит специальный переключатель полярности **5**, расположенный в нижней части панели электронного блока.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### Упражнение 1: Построение вольт - амперной характеристики вакуумного фотоэлемента

1. На оптической скамье расположите источник света **1**, набор светофильтров **2** и фотоэлемент **3** как можно ближе друг к другу.
2. Включите электронный блок приборов и установите ***режим ускоряющего напряжения*** при помощи специального переключателя полярности **5**, расположенного в нижней части панели электронного блока.
3. Выберите один из светофильтров и подберите такой накал лампы (то есть световой поток), чтобы фототок $I$ при напряжении $U = 0$ был в интервале 0,1÷ 0,3 мкА.
4. Увеличивая напряжение $U$ на фотоэлементе, как показано в табл. 1, измеряйте величину фототока $I$ до момента наступления тока насыщения $I_{нас}$ (то есть, величины такого фототока, который при дальнейшем увеличении напряжения изменяться не будет).
5. Результаты запишите в таблицу 1.

***Таблица 1***

| $\lambda$ = нм | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Напряжение $U, B$ | $U_з$ = | 0 | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| Фототок $I, мкА$ | 0 | | | | | | | | | |

6. При этом же светофильтре переключите режим работы при помощи специального переключателя полярности **5**, расположенного в нижней части панели электронного блока, на ***режим задерживающего напряжения*** $U_з$.
7. Определите задерживающее напряжение $U_з$ (т.е. напряжение, при котором фототок становится равным нулю).
Измерения $U_з$ проведите не менее трех раз и среднее значение запишите в первую графу таблицы 1.
7. Используя данные таблицы 1, постройте график зависимости силы тока $I$, текущего через фотоэлемент от напряжения $U$ на его электродах, то есть зависимость $I = f(U)$.
8. Сравните, полученную Вами экспериментальную вольт-амперную характеристику с теоретической, представленной на рис.1. Сделайте вывод.

### Упражнение 2: Определение работы выхода электронов из вещества $A_{вых}$ и постоянной Планка $h$ графическим методом

1. На оптической скамье расположите источник света **1**, набор светофильтров **2** и фотоэлемент **3** как можно ближе друг к другу. Установите в лампе накаливания максимальный ток.
2. В таблицу 2 запишите длины волн $\lambda$, пропускаемых светофильтром, в порядке их уменьшения.

***Таблица 2***

| Цвет светофильтра | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\lambda, нм$ | | | | | | | |
| $\nu, 10^{14}\ Гц$ | | | | | | | |
| Задерживающий потенциал $U_з, B$ | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Среднее значение $\langle U_з \rangle, B$ | | | | | | | |

Частоту света $\nu$ определите по формуле $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$, где $c = 3 \cdot 10^8 \dfrac{м}{с}$ - скорость света в вакууме, $\lambda$ - длина световой волны.

3. Поставьте переключателем тумблера **5** в нижней части панели электронного блока полярность напряжения на фотоэлементе в ***режим задерживающего напряжения***.
4. Плавно вращая ручку реостата $R$ (правая часть панели), определите задерживающий потенциал $U_з$ для каждого из светофильтров (не менее трех раз) и их среднее значение $\langle U_з \rangle$. Результаты запишите в таблицу 2.
5. По результатам эксперимента постройте график зависимости среднего значения задерживающего напряжения $\langle U_з \rangle$ от частоты падающего света $\nu$, то есть зависимость $\langle U_з \rangle = f(\nu)$ (см. рис. 2). Ваши экспериментальные точки должны лежать вблизи прямой линии, что следует из уравнения (3). Нарисуйте эту прямую.
Экстраполируйте (то есть продлите) получившуюся прямую линию до пересечения осей координат $\nu$ и $\langle U_з \rangle$ (см. рис. 2).

6. По графику определите красную границу фотоэффекта $\nu_{кр}$ (точка пересечения Вашей прямой с осью координат $\nu$)

и задерживающее напряжение $U_з = \frac{A_{вых}}{|e|}$ (точка пересечения Вашей прямой с осью координат $\langle U_з \rangle$ (см. рис. 2)).

7. По формуле $A_{вых} = U_з \cdot |e|$ определите работу выхода электронов из вещества $A_{вых}$ (где $U_з$ - это найденное по графику задерживающее напряжение)

8. Вычислите постоянную Планка по формуле $h = \frac{A_{вых}}{\nu_{кр}}$.

***Таким образом, Вы определите работу выхода $A$ и постоянную Планка $h$ графическим методом.***

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое явление внешнего фотоэффекта?
2. Нарисуйте вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента. Объясните их особенности.
   Что такое задерживающий потенциал $U_з$?
3. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
4. Сформулируйте и объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Что такое работа выхода электрона из вещества $A_{вых}$ и красная граница фотоэффекта $\nu_{кр}$?
5. Что такое фотон (квант света)? Напишите связь между корпускулярными и волновыми свойствами квантов света.

## Ответы на контрольные вопросы

### 1. Что такое явление фотоэффекта?

**Фотоэффектом** называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения (открыто в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем).

Различают внешний и внутренний фотоэффект.

**Внутренним фотоэффектом** называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения без вылета их за пределы вещества.

**Внешним фотоэффектом** называется явление вылета электронов с поверхности твёрдых и жидких веществ под действием электромагнитного излучения.
(при этом вещество электризуется, приобретая положительный заряд).

### 2. Нарисуйте вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента. Объясните их особенности. Что такое задерживающий потенциал?

Первые фундаментальные исследования внешнего фотоэффекта были проведены русским учёным Столетовым.
Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта приведена на рис. 2.

Два электрода (катод $K$ из исследуемого материала и анод $A$) в вакуумной трубке подключены к батарее $Б$ так, чтобы с помощью потенциометра $R$ можно было изменять не только значение, но и знак подаваемого на электроды напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом, измеряется включенным в цепь миллиамперметром.
В результате исследований Столетов получил следующие вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента (это зависимость силы тока $I$, текущего через фотоэлемент, от напряжения $U$ на его электродах (катоде $K$ и аноде $A$)):

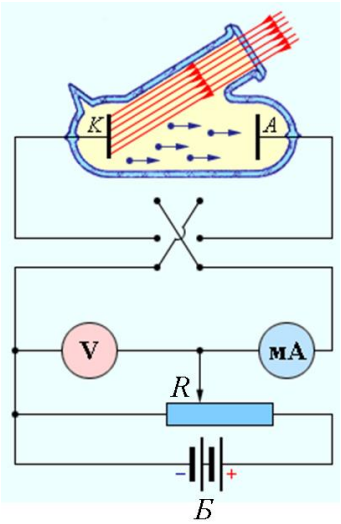
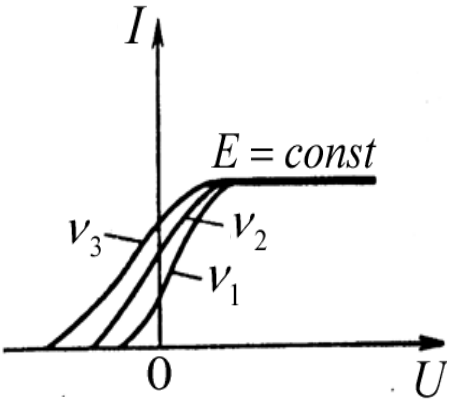
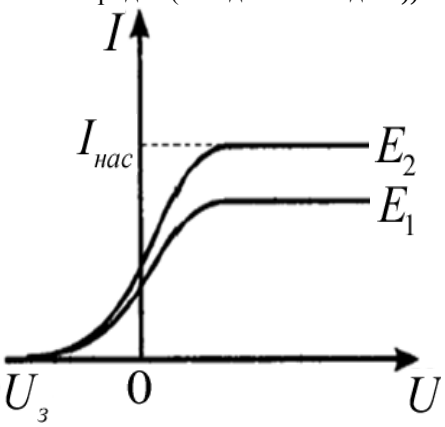



Рис.2

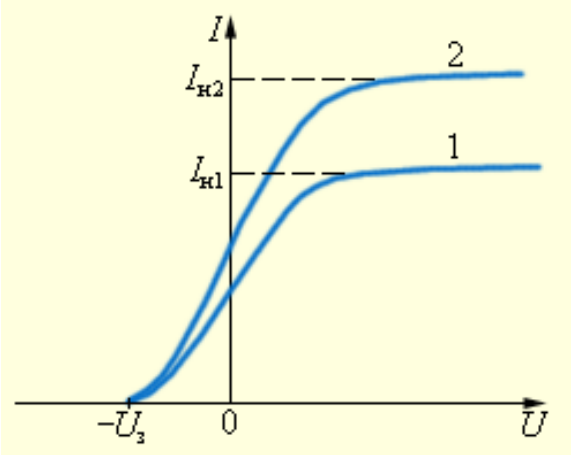



$E = const \quad \nu_3 > \nu_2 > \nu_1,$ $\qquad \nu = const \quad E_2 > E_1$

где $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ - это частоты падающего на фотокатод света,

а $E_2 > E_1$ - это освещённость фотокатода (она прямо пропорциональна интенсивности $I$ падающего на фотокатод света).




**Анализ вольт - амперных характеристик**

Анализ вольт - амперных характеристик вакуумного фотоэлемента показывает следующие закономерности:

1. При любой освещённости фотокатода $E$ существует ***ток насыщения*** $I_н$ (то есть максимальная величина силы тока при данной освещённости света).
Это объясняется тем, что анода достигают все фотоэлектроны, которые возникают при фотоэффекте за одно и то же время.
2. При $U = 0$ $В$ наблюдается небольшой фототок.
Это объясняется тем, что некоторая часть фотоэлектронов обладает достаточной скоростью и направлением движения, чтобы самостоятельно долететь до анода)
3. Чтобы прекратить фототок, необходимо на катод подать обратное напряжение (то есть на катод $K$ подать более высокий потенциал по отношению к аноду $A$). Это напряжение называется ***задерживающим*** или ***запирающим*** напряжением $U_з$.

Пологий ход кривой указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Для прекращения тока нужно приложить задерживающее напряжение $U_з$. При таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему наибольшей при вылете скоростью $v_{max}$, не удаётся преодолеть задерживающее электрическое поле между катодом и анодом, чтобы достичь анода и создать ток.

Измерив задерживающее напряжение $U_з$, по формуле $\frac{m v_{max}^2}{2} = eU_з$ можно определить максимальное значение скорости фотоэлектронов.

**3. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта**

При изучении вольт - амперных характеристик были получены следующие законы внешнего фотоэффекта:

1. Максимальная начальная скорость вылетающих фотоэлектронов $v_{\max}$ прямо пропорциональна частоте $\nu$ падающего на вещество света и не зависит от его интенсивности $I$.
2. При фиксированной частоте падающего на вещество света $\nu$, величина фототока (то есть число вылетающих из вещества за единицу времени электронов) прямо пропорциональна интенсивности света.
3. Для каждого вещества существует, так называемая, красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота $\nu_{кр}$ (или максимальная длина волны $\lambda_{кр}$) падающего на вещество света, при которой еще возможен фотоэффект.
4. Фотоэффект – явление безынерционное, то есть вылет электронов с поверхности вещества происходит практически мгновенно после поглощения веществом света (менее чем через $10^{-8}c$).

**4. Что такое работа выхода электрона из вещества $A_{вых}$ и красная граница фотоэффекта $\nu_{кр}$?**

**Сформулируйте и объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.**

***Работой выхода электрона из вещества $A_{вых}$*** называется минимальная работа, которую необходимо совершить электрону, чтобы вылететь с поверхности вещества в вакуум.

(работа выхода $A_{вых}$ является характеристикой вещества (величина табличная) и её значение не зависит от частоты $\nu$ и интенсивности $I$ падающего на вещество света).

**Красной границей фотоэффекта** называется минимальная частота $\nu_{кр}$ (или максимальная длина $\lambda_{кр}$) световой волны, при которой ещё возможен фотоэффект.

**Словесная формулировка уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:**

**Энергия $\varepsilon_ф = h\nu$, полученная от фотона, расходуется электроном на совершение им работы выхода $A_{вых}$ из вещества и на сообщение ему кинетической энергии $\frac{m v_{\max}^2}{2}$, с которой он вылетает из вещества:**

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m v_{\max}^2}{2}, \qquad (1)$$

где $v_{max}$ - максимальная скорость движения вылетающих фотоэлектронов, *м/с*;

$A_{вых}$ - работа выхода фотоэлектронов из вещества (это минимальная работа, которую должен совершить фотоэлектрон, чтобы выйти из поверхности вещества в вакуум), *Дж*.

Работа выхода электрона из вещества $A_{вых}$ является характеристикой данного вещества и не зависит от частоты $\nu$ и интенсивности $I$ падающего на вещество света.

Явление фотоэффекта и его закономерности объясняются на основе предложенной в 1905 г. Эйнштейном ***квантовой теории фотоэффекта***.

Согласно этой теории свет частотой $\nu$ не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\varepsilon_ф = h\nu$, а импульс $p_ф = \frac{h}{\lambda}$.

Кванты видимого диапазона электромагнитного излучения получили название **фотонов**.

Согласно гипотезе Эйнштейна, каждый фотон падающего светового потока взаимодействует только с одним электроном вещества, передавая ему всю свою энергию. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть прямо пропорционально интенсивности света $I$ (что соответствует первому закону фотоэффекта).

Следовательно, максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов (у тех из них, которые взаимодействовали с фотоном у самой поверхности) на основании закона сохранения энергии должна подчиняться следующему соотношению, которое называется ***уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта***:

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m v_{\max}^2}{2}, \qquad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения $\nu$ и не зависит от его интенсивности $I$, так как ни работа выхода $A_{вых}$, ни частота $\nu$ от интенсивности света не зависит (второй закон фотоэффекта).

Так как с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного фотокатода $A=const$), то при некоторой достаточно малой частоте $\nu_{кр}$ кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (третий закон фотоэффекта).

Согласно изложенному, из уравнения (2) получим формулу: $\nu_{кр} = \frac{A}{h}$, которая и позволяет определить красную границу фотоэффекта $\nu_{кр}$ для данного вещества.

## 5. Что такое фотон (квант света)? Напишите связь между корпускулярными и волновыми свойствами квантов света

Наблюдения показывают, что свет в одних явлениях ведёт себя как волна (явления дифракции, поляризации, интерференции), а в других явлениях ведёт себя как частица (закономерности теплового излучения, явление фотоэффекта и др).

***Светом*** (или видимым излучением) называются электромагнитные волны с длиной волны от ***380 нм*** до ***760 нм***, которые воспринимаются органами зрения человека. (1 нм (нанометр) = $10^{-9}$ м).

1. Свет представляет собой поток особых частиц, называемых ***квантами*** света или ***фотонами***.
Кванты света излучаются атомами вещества при переходе электронов с орбиты с большей энергией на орбиту с меньшей энергией, в результате чего излишек энергии за время перехода ($\approx 10^{-8} c$) излучается в виде кванта света, который представляет собой ограниченный в пространстве, так называемый, **цуг** электромагнитной волны длиной $\approx 3 м$.

2. Каждый фотон несёт с собой энергию $E_ф = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (где $h = 6.62 \cdot 10^{-34}\, Дж \cdot c$ - постоянная Планка), $\nu$ - частота световой волны, $\lambda$ - длина световой волны). Фотон существует только в движении и всегда имеет одну и ту же скорость $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{c}$. Движущийся фотон обладает массой $m_ф = \frac{h\nu}{c^2}$ и импульсом $p_ф = \frac{h}{\lambda} = m_ф c$.
Так как покоящихся фотонов не существует, то говорят, что масса покоя фотона равна нулю.

3. Корпускулярные свойства света проявляются именно в том, что свет всегда излучается, распространяется в пространстве и поглощается веществом только порциями (то есть квантами). Причём поглощается фотон всегда целиком, а не частями. При поглощении фотон исчезает, передав свой импульс и энергию веществу.

### Связь между корпускулярными и волновыми свойствами квантов света

**Масса $m_ф$, импульс $p_ф$ и энергия $E_ф$ фотона**

| Корпускулярные характеристики | Волновые характеристики |
|---|---|
| $E_ф = m_ф c^2$ | $E_ф = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ |
| $p_ф = m_ф c$ | $p_ф = \frac{h}{\lambda}$ |

где $E_ф$ - энергия фотона в *Дж* или *эВ*; $p_ф$ - импульс фотона, $Н \cdot с$; $m_ф = \frac{h\nu}{c^2}$ - масса фотона, *кг*;

$c = \lambda \nu = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{c}$ - скорость света в вакууме.