

Ст. преподаватель Виноглядov В.Н.

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

Студент: _____ группа: _____

Допуск _____ Выполнение _____ Защита _____

Цель работы: Исследование вольтамперной характеристики вакуумного фотоэлемента и определение работы выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$, красной границы фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$ и постоянной Планка h .

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

Описание выполнения работы

В данной работе необходимо опытным путём построить вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента и определить работу выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$ и постоянную Планка h сначала графическим методом, а потом более точно методом наименьших квадратов (см. лабор. работу 0-1).

Теоретическая вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента представлена на рис. 1.

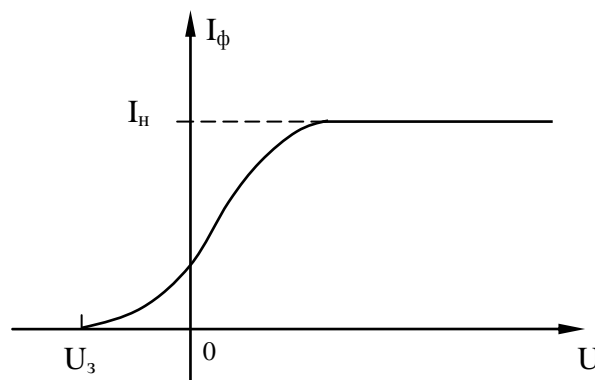


Рис. 1 Вольтамперная характеристика фотоэлемента

Из анализа рис. 1 видно, что

- 1) при определённом напряжении увеличение фототока прекращается, и ток достигает, так называемого, **тока насыщения** I_n ,
- 2) при напряжении на фотоэлементе равном нулю существует небольшой ток,
- 3) при подаче на фотоэлемент отрицательного напряжения (то есть на катод подают более высокий потенциал по отношению к аноду) фототок постепенно убывает, обращаясь в нуль при некотором напряжении $U_з$, называемом **задерживающим** (или **запирающим**)

Математически закономерности внешнего фотоэффекта описываются уравнением Эйнштейна:

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

где $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, ν - частота падающего на вещество света, Гц,

$A_{\text{вых}}$ - работа выхода электрона из вещества, Дж,

$\frac{m v_{\text{max}}^2}{2}$ - максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов, Дж.

Максимальная начальная скорость фотоэлектронов связана с задерживающей разностью потенциалов $U_з$

соотношением

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

где e и m - заряд и масса электрона.

С учетом (2) уравнение (1) можно записать в виде

$$h\nu = A_{\text{вых}} + e U_з. \quad (3)$$

Из уравнения (3) можно выразить зависимость задерживающей разности потенциалов $U_з$ от частоты ν падающего на вещество света:

$$U_з = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e} \quad (4)$$

Уравнение (4) есть уравнение прямой линии (см. рис.2).

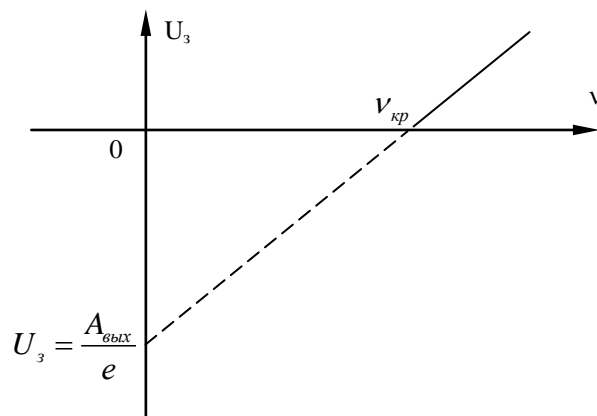


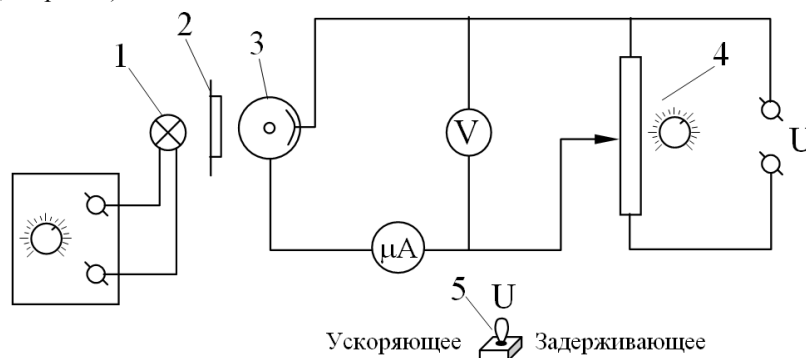
Рис. 2 Зависимость задерживающей разности потенциалов U_3 от частоты ν падающего на катод света

На оси ординат эта прямая отсекает отрезок равный $U_3 = \frac{A_{\text{вых}}}{e}$. А точка пересечения прямой с осью абсцисс дает граничную частоту (*красную границу фотоэффекта*) $\nu_{kp} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$. При этом угловой коэффициент нашей прямой равен тангенсу угла наклона α её к оси частот и определяет величину: $\text{tg} \alpha = \frac{h}{|e|}$.

Изучение закона Столетова состоит в построении графика зависимости фототока насыщения I_n от светового потока Φ , падающего на фотокатод.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Фотоэффект изучают на установке, состоящей из фотоэлемента и лампы накаливания, 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 заключен в защитный кожух с окном и представляет собой стеклянный баллон, половина которого изнутри покрыта тонким слоем щелочного металла.

Источником света является галогеновая лампа накаливания, напряжение на которой может регулироваться ручкой, размещенной в левой части лицевой панели электронного блока.

Монохроматическое излучение получают с помощью светофильтров, закрепленных во вращающейся оправе (длина волны λ пропускания светофильтров указаны на установке). Фототок измеряют цифровым микроамперметром. Напряжение на фотоэлементе может изменяться вращением ручки реостата и измеряется цифровым вольтметром. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжений служит специальный переключатель полярности, расположенный в нижней части панели электронного блока.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1: Построение вольтамперной характеристики

1. На оптической скамье расположите источник света, набор светофильтров и фотоэлемент как можно ближе друг к другу.
2. Включите электронный блок приборов и установите режим ускоряющего напряжения. Выберите один из светофильтров и подберите такой накал лампы (световой поток), чтобы фототок при $U=0$ был в интервале $0,1 \div 0,3$ мкА.
3. Увеличивая напряжение на фотоэлементе, как показано в табл. 1, измеряйте величину фототока до момента наступления тока насыщения. Результаты запишите в таблицу 1.

Таблица 1

		$\lambda =$ нм								
Напряжение U , В	$U_3 =$	0	1	2	4	8	12	14	16	18
Фототок I , мкА	0									

4. При этом же светофильтре переключите режим работы на задерживающее напряжение, определите задерживающий потенциал U_3 (т.е. напряжение, при котором фототок становится равным 0) и результат запишите в первую графу таблицы Измерения U_3 проведите не менее трех раз.
5. Постройте график зависимости $I = f(U)$.

Упражнение 2: Определение работы выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$ и постоянной Планка h графическим методом

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

Таблица 2

Цвет светофильтра							
λ , нм							
ν , 10^{14} Гц							
Задерживающий потенциал U_3 , В							
Среднее значение U_3 , В							

3. По формуле $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, определите частоту света, пропускаемого светофильтрами.
4. Поменяйте полярность напряжения на фотоэлементе. Для этого переключите тумблер в нижней части панели электронного блока в режим задерживающего напряжения.
5. Плавное вращая ручку реостата (правая часть панели), определите задерживающий потенциал для каждого из светофильтров (не менее трех раз) и среднее U_3 . Результаты запишите в таблицу 2.
6. Постройте график линейной зависимости $U_3 = f(\nu)$. Экстраполируйте получившуюся прямую до пересечения с осью ординат (см. рис. 2).
7. По графику определите красную границу фотоэффекта $\nu_{кр}$ и задерживающее напряжение $U_3 = \frac{A_{\text{вых}}}{e}$.
8. По формуле $A_{\text{вых}} = U_3 e$, где $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона, определите работу выхода $A_{\text{вых}}$ электрона из вещества.

9. Вычислите постоянную Планка по формуле

$$h = \frac{A_{\text{вых}}}{\nu_{кр}}$$

Таким образом, Вы определите работу выхода электрона и постоянную Планка графическим методом.

Упражнение 3: Определение работы выхода электрона из вещества $A_{\text{вых}}$ и постоянной Планка h методом наименьших квадратов

Теперь определите постоянную Планка h и работу выхода $A_{\text{вых}}$ методом наименьших квадратов.

Для этого воспользуемся уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта $h\nu = A_{\text{вых}} + |e|U_3$ и приведём его к следующему виду:

$$U_3 = \frac{h}{|e|} \nu - \frac{A_{\text{вых}}}{|e|}, \quad (10)$$

где U_3 в уравнении (10) берётся по модулю.

Введите следующие обозначения: $y = U_3$; $x = \nu$; $a = \frac{h}{|e|}$; $b = -\frac{A_{\text{вых}}}{|e|}$.

Тогда уравнение (10) приведём к линейному виду $y = ax + b$. Неизвестные параметры a и b определим из совместных измерений.

Таким образом, используя методику совместных измерений (см. лаб. работу 0-1), можно определить коэффициенты

a и b по ниже приведенным формулам: $a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}$ и $b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}$ (11)

1. Средние значения постоянной Планка $\langle h \rangle$ и работы выхода электрона из вещества $\langle A_{\text{вых}} \rangle$ определите по формулам:

$$\langle h \rangle = a|e| \quad \text{и} \quad \langle A_{\text{вых}} \rangle = b|e|$$

2. Величину дисперсии параметров a и b найдите по формулам:

$$S_a^2 = \frac{n}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{n-2}, \quad S_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{n-2} \quad (12)$$

где n – число опытов.

3. Дисперсии S_h^2 и S_A^2 определите по формулам $S_h^2 = \left(\frac{\partial h}{\partial a}\right)^2 S_a^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial e}\right)^2 S_e^2$ и $S_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial b}\right)^2 S_b^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial e}\right)^2 S_e^2$,

где частные производные $\frac{\partial h}{\partial a}$ и $\frac{\partial h}{\partial e}$ найдите из $\langle h \rangle = a|e|$, а производные $\frac{\partial A}{\partial b}$ и $\frac{\partial A}{\partial e}$ из $\langle A_{\text{вых}} \rangle = b|e|$.

Дисперсия S_e^2 равна квадрату табличной погрешности заряда электрона (вспомните лаб. работу 0-1). ($e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$).

4. Окончательный результат запишите в виде $h = \langle h \rangle \pm S_h$ и $A_{\text{вых}} = \langle A_{\text{вых}} \rangle \pm S_A$ и сравните эти значения с полученными в упражнении 2.

5. Определите относительную погрешность измерения постоянной Планка: $\varepsilon = \left| \frac{h_{\text{теория}} - h_{\text{практика}}}{h_{\text{теория}}} \right| \cdot 100 \%$,

где $h_{\text{теория}} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, а $h_{\text{практика}} = \langle h \rangle$.

6. Сделайте соответствующий вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Нарисуйте вольтамперные характеристики вакуумного фотоэлемента. Объясните их особенности.
3. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
4. Сформулируйте и объясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
5. Что понимают под красной границей фотоэффекта? Что такое работа выхода электрона из вещества?
6. Объясните термин "задерживающая разность потенциалов". Как найти задерживающий потенциал?
7. Что такое фотон (квант света)? Чему равен импульс и энергия фотона? Связь между длиной волны, частотой и скоростью фотона.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРИТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

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

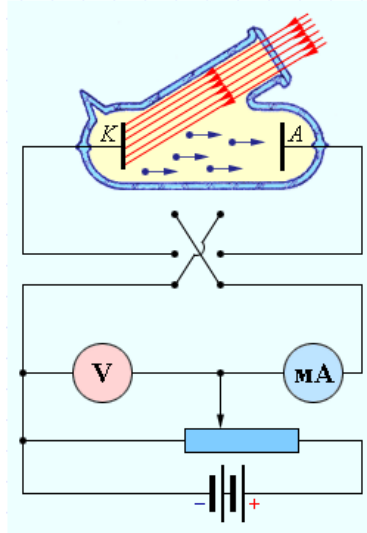
Внутренним фотоэффектом называется явление вырывания электронов из атомов вещества под действием электромагнитного излучения без вылета их за пределы вещества.

(при этом происходит перераспределение электронов по энергетическим состояниям внутри вещества в результате их перехода из связанных с атомами состояний в свободные).

Внешним фотоэффектом называется явление вылета электронов с поверхности твёрдых и жидких веществ под действием электромагнитного излучения.

(при этом вещество электризуется, приобретая положительный заряд).

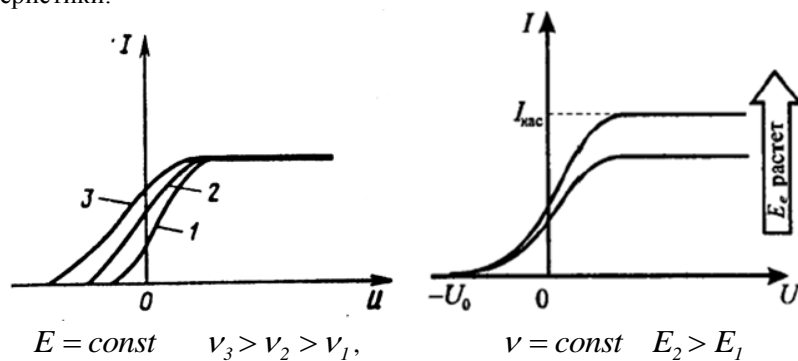
Первые фундаментальные исследования внешнего фотоэффекта были проведены русским учёным Столетовым.



Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта приведена на рис.

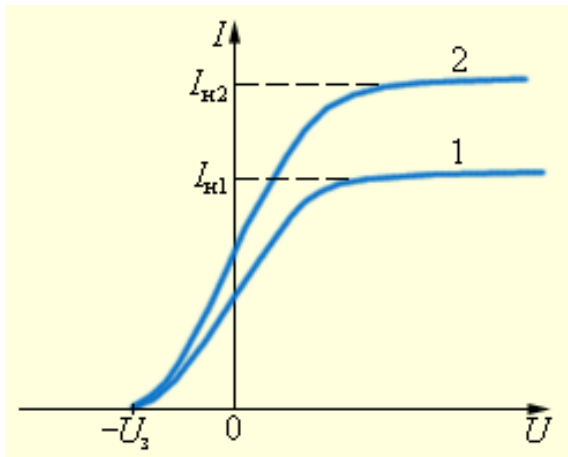
Два электрода (катод K из исследуемого материала и анод A) в вакуумной трубке подключены к батарее так, чтобы с помощью потенциометра можно было изменять не только значение, но и знак подаваемого на электроды напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом, измеряется включенным в цепь миллиамперметром.

В результате исследований Столетов получил следующие вольт-амперные характеристики:



где $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$ - это частоты падающего на фотокатод света, а $E_2 > E_1$ - это освещённость фотокатода.

Анализ вольт - амперных характеристик



Анализ вольт - амперных характеристик показывает следующие закономерности:

1. При любой освещённости фотокатода E существует **ток насыщения** I_n (то есть максимальная величина 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 подать более высокий потенциал по отношению к аноду). Это напряжение называется **задерживающим** или **запирающим** U_3 .

Пологий ход кривой указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Для прекращения тока нужно приложить задерживающее напряжение U_3 . При таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему наибольшей при вылете скоростью v_{max} , не удаётся преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода.

Измерив задерживающее напряжение U_3 , по формуле $\frac{mv_{max}^2}{2} = |e|U_3$ можно определить максимальное значение скорости фотоэлектронов.

Законы внешнего фотоэффекта

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

1. Максимальная начальная скорость вылетающих фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте ν падающего на вещество света и не зависит от его интенсивности I .
2. При фиксированной частоте падающего на вещество света, 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 сразу после поглощения веществом света.

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

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

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 пропорционально интенсивности света I (что соответствует первому закону фотоэффекта).

Энергия, полученная от фотона, расходуется электроном на совершение им работы выхода $A_{\text{вых}}$ из вещества и на сообщение ему кинетической энергии, с которой он вылетает из вещества.

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**:

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

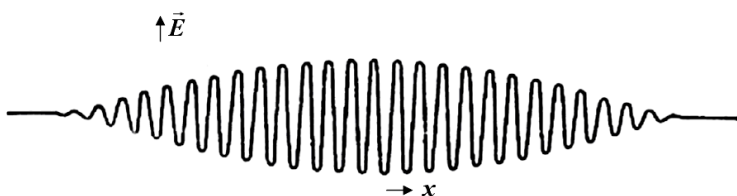
где v_{max} - максимальная скорость вылетающих фотоэлектронов.

Из уравнения (1) следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности, так как ни работа выхода $A_{\text{вых}}$, ни частота ν от интенсивности света не зависят (второй закон фотоэффекта).

Из (1) следует, что с уменьшением частоты падающего на вещество света ν будет линейно уменьшаться кинетическая энергия фотоэлектронов (так как для данного вещества $A_{\text{вых}} = \text{const}$). Следовательно, при некоторой достаточно малой частоте $\nu_{кр}$ (которая называется **красной границей фотоэффекта**), кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (третий закон фотоэффекта).

Связь волновых и корпускулярных свойств 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). Поэтому характеристики фотона иногда описывают через характеристики частиц (масса фотона m_{ϕ}), а иногда через характеристики волны (частоту ν и длину волны λ).



Схематическое представление кванта света.
Рисунок показывает распределение напряжённости электрического поля E от координаты x в некоторый момент времени.

Энергия фотона

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{или} \quad E_{\phi} = m_{\phi}c^2$$

Импульс фотона

$$p_{\phi} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{или} \quad p_{\phi} = m_{\phi}c$$

Скорость света в вакууме

$$c = \lambda \nu = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

где E_{ϕ} - энергия фотона в Дж, p_{ϕ} - импульс фотона, Н с, $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$ - масса фотона, кг

ν - частота фотона, Гц, λ - длина волны фотона, м, $c = \lambda \nu = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость света в вакууме.