

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 5.1.1

Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для
фотоэффекта и определение постоянной Планка

Выполнили:

Гисич Арсений
Вазюля Василиса

Б03-101

1 Аннотация

В данной работе исследовалась зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения, что позволяет вычислить величину постоянной Планка.

2 Теоретические сведения

Фотоэффект — явление испускания электронов фотокатодом, облучаемым светом. Это явление хорошо объясняется фотонной теорией света. Взаимодействие монохроматического света с веществом можно описывать как взаимодействие с веществом частиц, называемых фотонами, которые обладают энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar\omega/c$. При столкновении фотона с электроном фотокатода энергия фотона полностью передается электрону, и фотон прекращает свое существование. Энергетический баланс этого взаимодействия для вылетающих электронов описывается уравнением

$$\hbar\omega = E_{max} + W \quad (1)$$

Здесь E_{max} — максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из фотокатода, W — работа выхода электрона из катода. Реально энергетический спектр вылетевших из фотокатода электронов непрерывен — он простирается от нуля до E_{max} .

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов вблизи фотокатода обычно располагается второй электрод (анод), на который подается задерживающий ($V < 0$) или ускоряющий ($V > 0$) потенциал. При достаточно больших ускоряющих напряжениях фототок достигает насыщения (рис. 1): все испущенные электроны попадают на анод.

Рис. 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде фотоэлемента

При задерживающих потенциалах на анод попадают лишь электроны, обладающие достаточно большой кинетической энергией, в то время как медленно движущиеся электроны заворачиваются полем и возвращаются на катод. При некотором значении $V = -V_0$ (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода. Максимальная кинетическая энергия E_{max} электронов связана с запирающим потенциалом V_0 очевидным соотношением $E_{max} = eV_0$. Тогда (1) примет вид, называемый уравнением Эйнштейна:

$$eV_0 = \hbar\omega - W \quad (2)$$

Чтобы определить величину запирающего напряжения, нам надо правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость к нулю, т. е. определить, какова функциональная зависимость $I(V)$. Расчет для простейшей геометрии — плоский катод, освещаемый светом, и параллельный ему анод — приводит к зависимости

$$\sqrt{I} \propto V_0 - V \quad (3)$$

т. е. корень квадратный из фототока линейно зависит от запирающего напряжения. Эта зависимость хорошо описывает экспериментальные данные.

В работе изучается зависимость фототока из фотоэлемента от величины задерживающего потенциала V для различных частот света ω , лежащих в видимой области спектра. С целью экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна определяются потенциалы

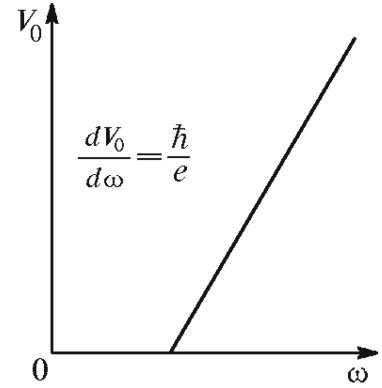
запираания V_0 при разных частотах света и строится зависимость $V_0(\omega)$, которая, как это следует из (2), должна иметь вид

$$V_0(\omega) = \frac{\hbar\omega - W}{e} \quad (4)$$

Потенциал запираания V_0 для любого катода линейно зависит от частоты света ω . По наклону прямой на графике $V_0(\omega)$ (рис. 2) можно определить постоянную Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e} \quad (5)$$

Как показывает формула (5), угол наклона прямой $V_0(\omega)$ не зависит от рода вещества, из которого изготовлен фотокатод. От рода вещества, однако, зависит величина фототока, работа выхода W и форма кривой $I(V)$ (рис. 1). Все это определяет выбор пригодных для опыта катодов.



3 Методика измерений

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Свет от источника S (обычная электрическая лампа накаливания) с помощью конденсора фокусируется на входную щель призматического монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента ФЭ.

Рис. 2: Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Фотоэлемент конструктивно представляет собой откачанный до высокого вакуума стеклянный баллон диаметром 25 мм и высотой 30 мм. Внутри баллона расположены два электрода: фотокатод и анод. Фотокатод представляет собой тонкую пленку металла, легированного элементами Na , K , Sb и Cs и расположенного на массивной металлической пластине. Анод фотоэлемента выполнен в виде пояска тонкой пленки, осажденной на внутренней части боковой поверхности сверху баллона. Такое расположение фотокатода и анода обеспечивает наиболее полный сбор на аноде электронов, эмитированных фотокатодом. Фотокатод и анод имеют вплавленные в стекло колбы никелевые выводы для подключения к внешней схеме. Такой фотоэлемент обладает спектральной чувствительностью в области длин волн от 300 до 850 нм. Наибольшая чувствительность ФЭ лежит в области от 400 до 500 нм.

Фототок, протекающий в фотоэлементе, мал, особенно при потенциалах V , близких к V_0 , и не может быть измерен непосредственно. Для его измерения используется усилитель постоянного тока. Для уменьшения погрешностей измерений, обусловленных наводками, усилитель фототока смонтирован в одном корпусе с ФЭ. Абсолютные значения фототока нам не нужны, поэтому он измеряется в относительных единицах цифровым вольтметром V_2 , подключенным к выходу усилителя. Эти показания пропорциональны величине измеряемого тока. Тормозящий потенциал регулируется при помощи двух потенциометров «Грубо» и «Плавно», установленных на корпусе блока питания установки. Измерение тормозящего потенциала осуществляется с помощью цифрового вольтметра V_1 .

Контактная разность потенциалов между катодом и анодом мешает точному определению величины V_0 , но не оказывает влияния на определение постоянной Планка, которая выражается через производную $dV_0/d\omega$.

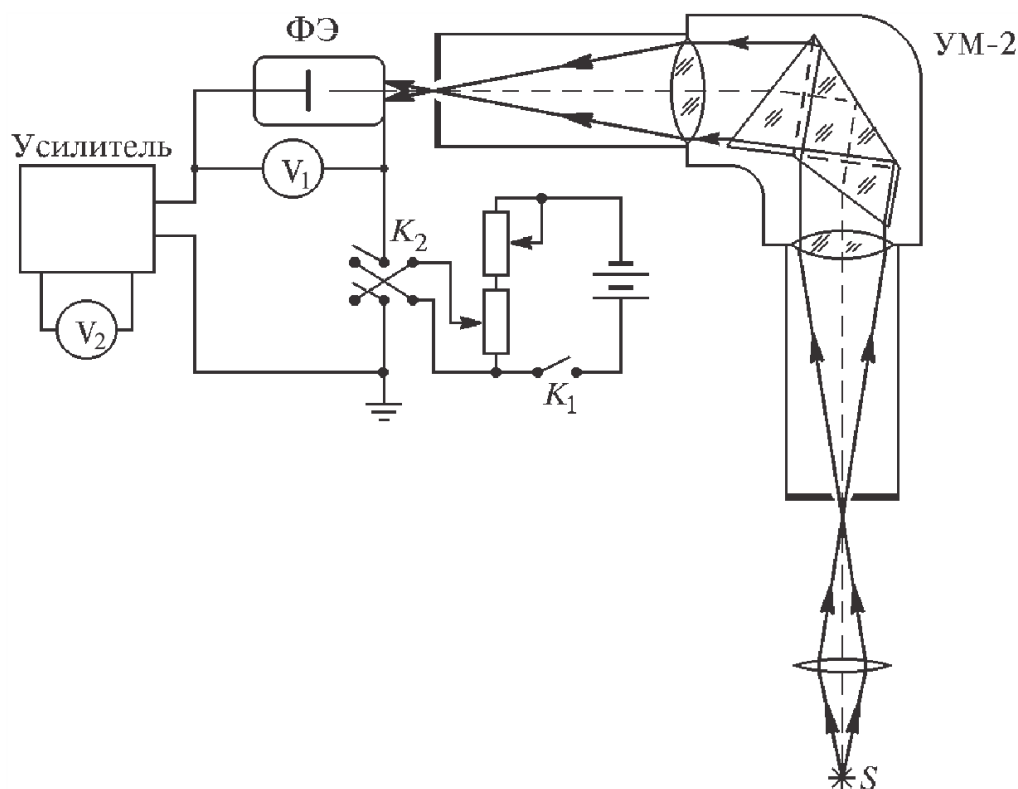


Рис. 3: Принципиальная схема экспериментальной установки

4 Результаты измерений и обработка данных

Сначала выполним градуировку монохроматора. Проведем серию измерений для линий спектра неона, снимая зависимость длины волны света от параметра θ барабана монохроматора. Построим графики зависимости, аппроксимируя функцию $\lambda(\theta)$ многочленом второй степени в силу нелинейности. Градуировочный график представлен на рис. 4.

Теперь проведем 6 серий измерений зависимости фототока от напряжения для разных длин волн падающего света, изменяя на монохроматоре параметр θ и переводя его в длину волны с помощью градуировки.

Результаты измерений представлены на рис. 5-10. Согласно формуле (3), построим графики зависимости в координатах $\sqrt{I}(V)$ и аппроксимируем линейные участки прямой. Экстраполируя прямую к нулю, получим значения потенциала запирающего для каждой серии измерения (длины волны). Результаты представлены в таб. 1.

Теперь построим график зависимости $V_0(\omega)$. Согласно (4) аппроксимируем прямой.

Из наклона прямой согласно (5) получаем значение постоянной Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e} \Rightarrow \hbar = 5,28 \cdot 10^{-16} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \approx (0,84 \pm 0,25) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

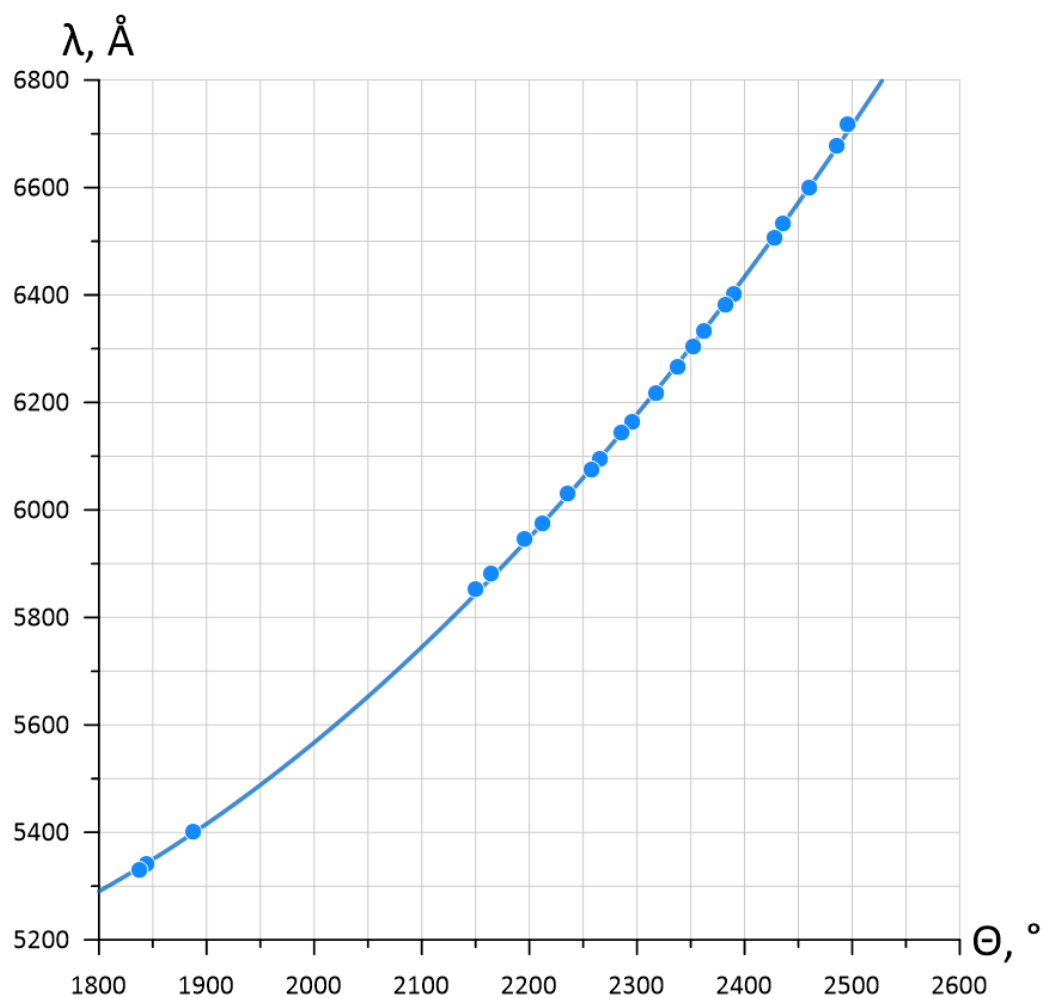


Рис. 4: Градуировочная кривая

$\lambda, \text{\AA}$	a	b	$-V_0, \text{В}$
5401	0.334	0.249	0.75 ± 0.07
5945	0.363	0.247	0.68 ± 0.07
6074	0.348	0.209	0.60 ± 0.06
6267	0.423	0.229	0.54 ± 0.05
6533	0.410	0.181	0.44 ± 0.04
6717	0.460	0.190	0.41 ± 0.04

Таблица 1: Параметры линейной аппроксимации для различных длин волн и запирающее напряжение

5 Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, в ходе выполнения работы мы убедились в явлении фотоэффекта и с помощью уравнения Эйнштейна измерили постоянную Планка. Полученное значение:

$$\hbar = (0,84 \pm 0,25) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Табличное значение: $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$. Полученный результаты близок к табличному значению.

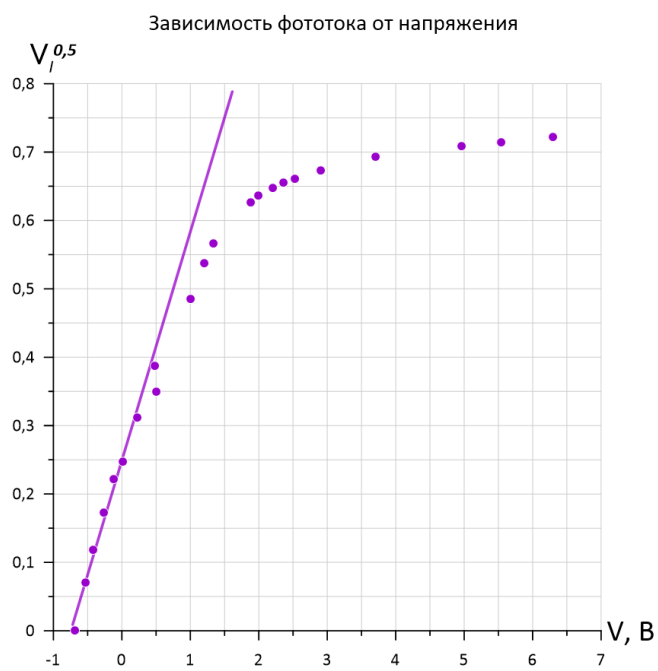


Рис. 5: $\lambda = 5401\text{\AA}$

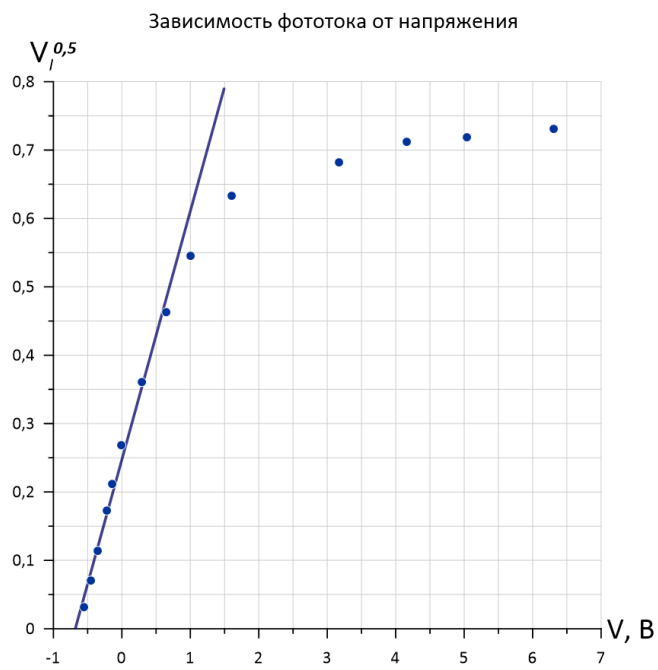


Рис. 6: $\lambda = 5945\text{\AA}$

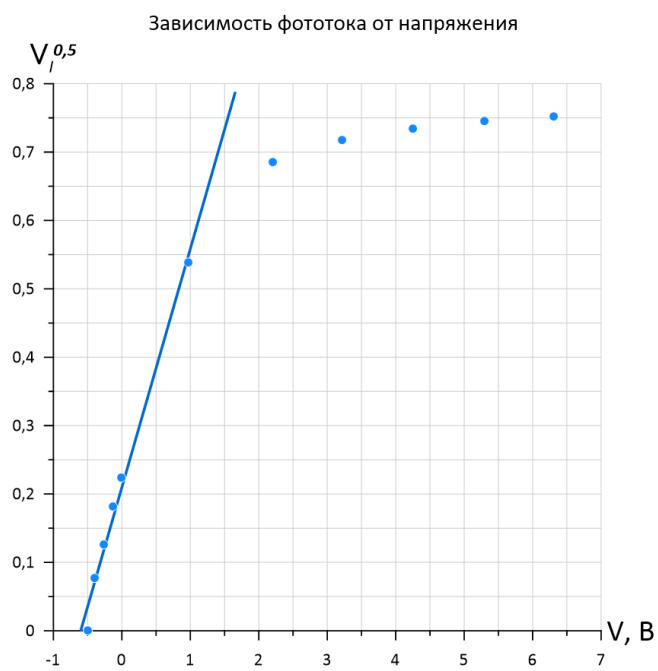


Рис. 7: $\lambda = 6074 \text{Å}$

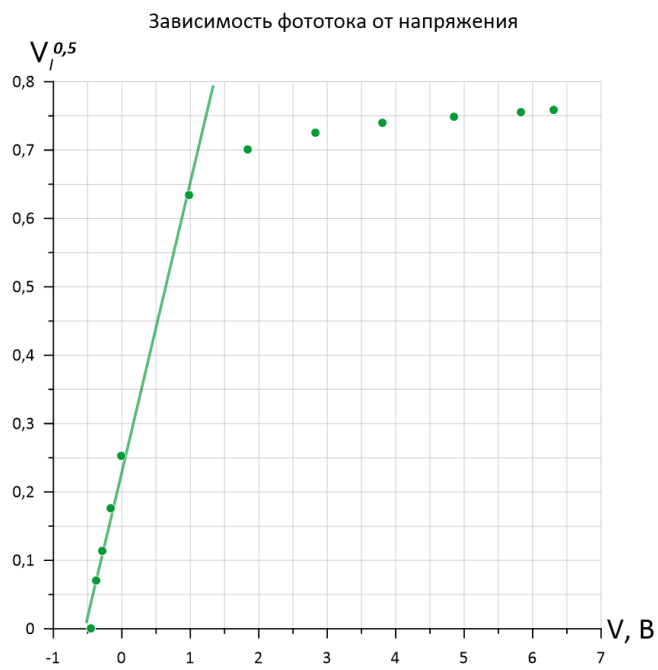


Рис. 8: $\lambda = 6267 \text{Å}$

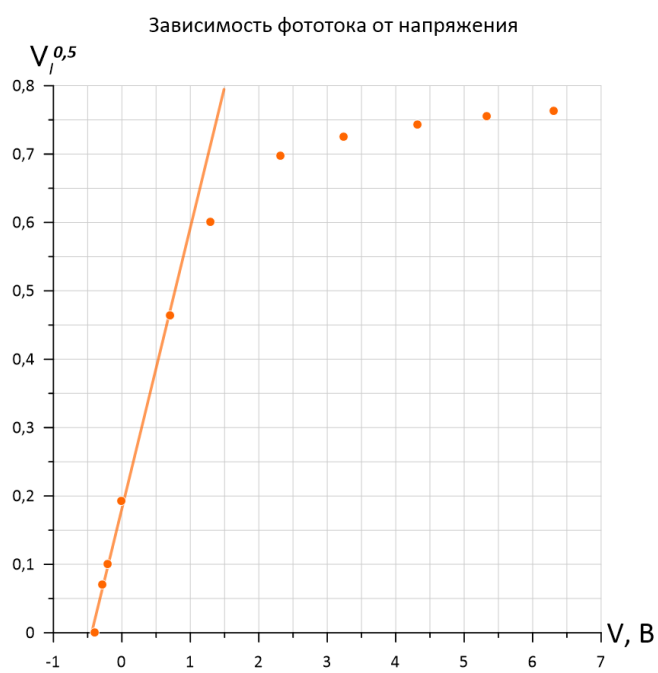


Рис. 9: $\lambda = 6533 \text{ \AA}$

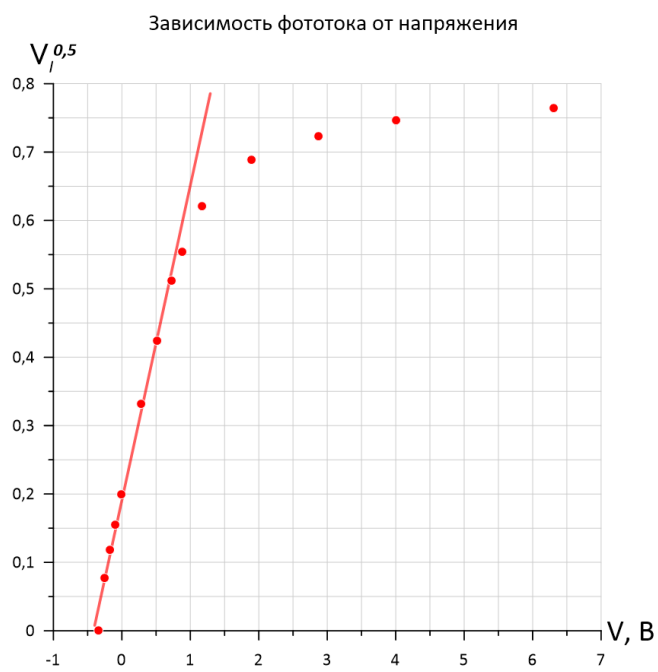


Рис. 10: $\lambda = 6717 \text{ \AA}$

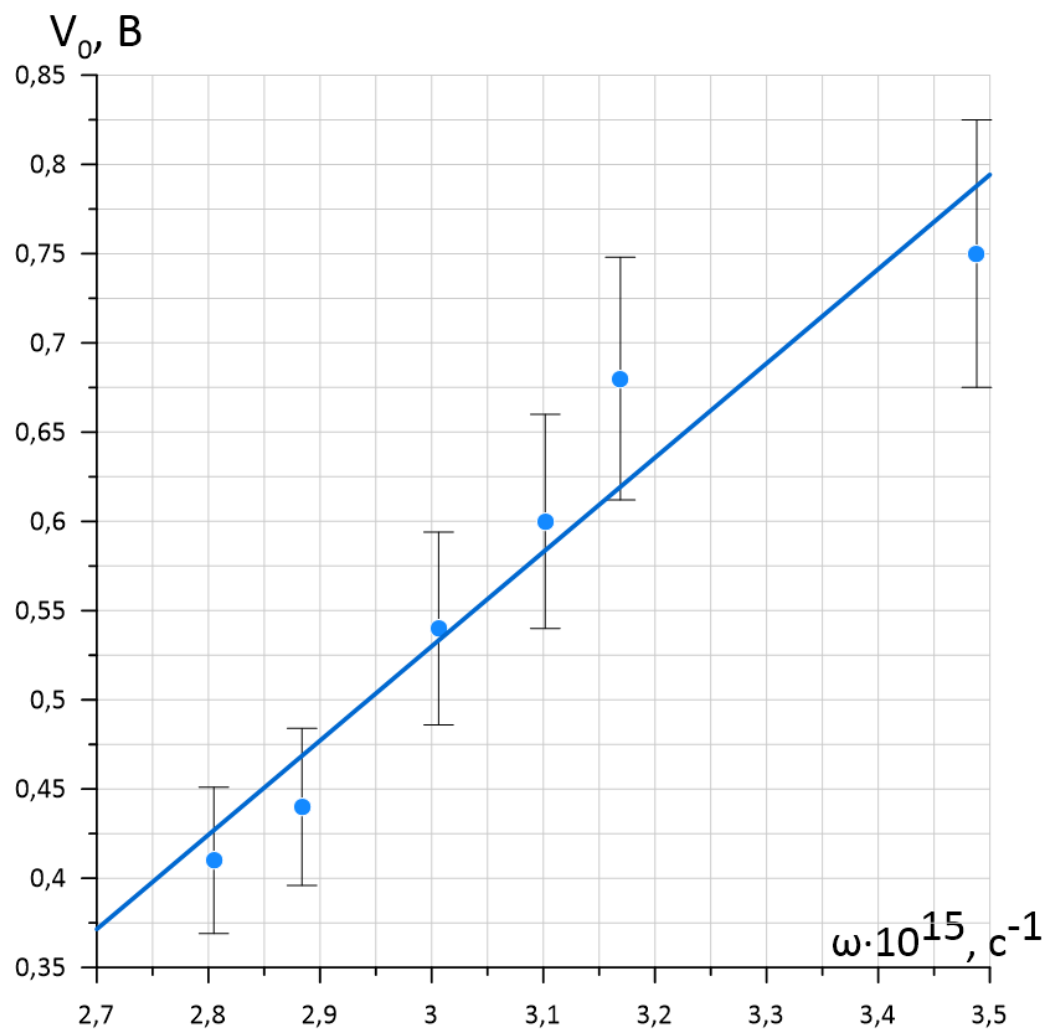


Рис. 11: График зависимость запирающего напряжения от частоты излучения