

Лабораторная работа №5.1.1  
Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для  
фотоэффекта и определение постоянной Планка

Рожков А. В.

10 ноября 2025 г.

**Цель работы:** исследовать зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения, что позволяет вычислить величину постоянной Планка.

**В работе используются:** источник света, конденсор, монохроматор УМ-2, фотоэлемент с усилителем постоянного тока.

## 1 Теоретические сведения

Фотоэффект – явление испускания электронов фотокатодом, облучаемым светом. 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

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

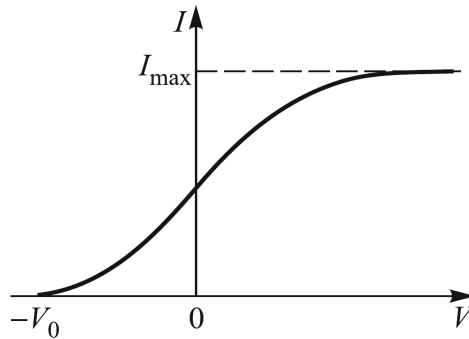


Рис. 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде фотоэлемента

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.

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  $\omega$ , лежащих в видимой области спектра.

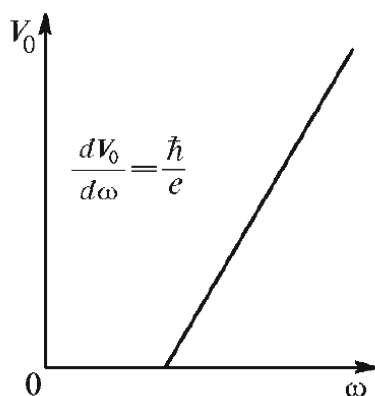


Рис. 2: Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Потенциал записания  $V_0$  для любого катода линейно зависит от частоты света  $\omega$ :

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

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.

## 2 Экспериментальная установка

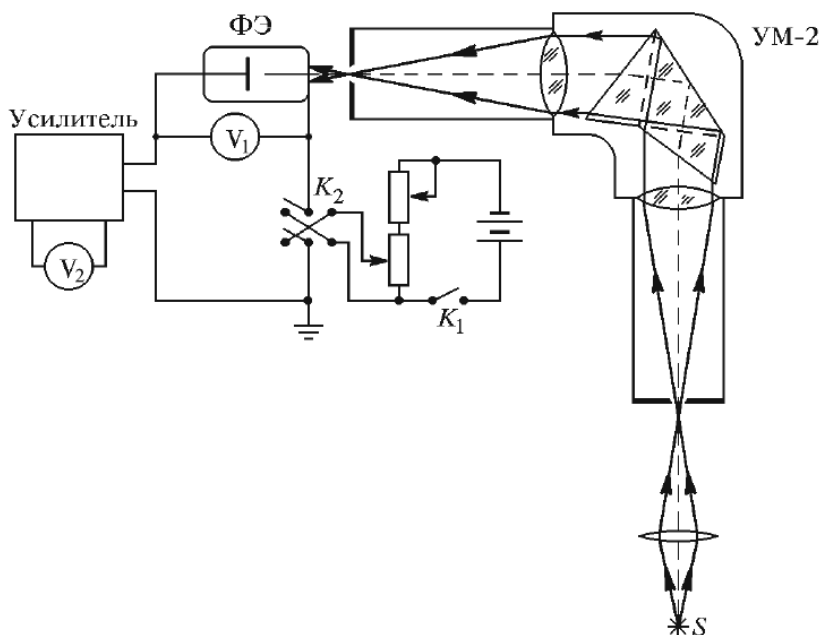


Рис. 3: Принципиальная схема экспериментальной установки

Свет от источника  $S$  (обычная электрическая лампа накаливания) с помощью конденсора фокусируется на входную щель призмного монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента ФЭ.

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 вверху баллона. Такое расположение фотокатода и анода обеспечивает наиболее полный сбор на аноде электронов, эмитированных фотокатодом. Такой фотоэлемент обладает спектральной чувствительностью в области длин волн от 300 до 850 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. 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. 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  $dV_0/d\omega$ .

## 3 Ход работы

### 3.1 Градуировка монохроматора

Проведём градуировку монохроматора по неоновой лампе с известным спектром. Результаты в таблице 1 и на рис. 4. Аппроксимацию проводим полиномом третьей степени:

$$\lambda = 9.56 * 10^{-7} \theta^3 - 5.99 * 10^{-3} \theta^2 + 14.0 \theta - 6.62 * 10^3$$

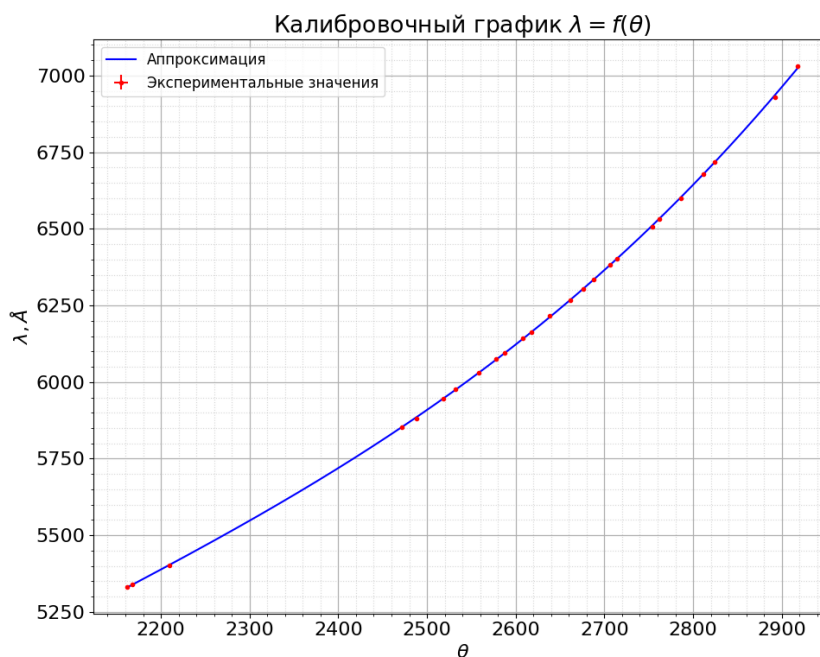


Рис. 4: Градуировочный график монохроматора

$\theta$	$\lambda, \text{\AA}$	$\theta$	$\lambda, \text{\AA}$
$2918 \pm 2$	7032	$2618 \pm 2$	6164
$2892 \pm 2$	6929	$2608 \pm 2$	6143
$2824 \pm 2$	6717	$2588 \pm 2$	6096
$2812 \pm 2$	6678	$2578 \pm 2$	6074
$2786 \pm 2$	6599	$2558 \pm 2$	6030
$2762 \pm 2$	6533	$2532 \pm 2$	5976
$2754 \pm 2$	6507	$2518 \pm 2$	5945
$2714 \pm 2$	6402	$2488 \pm 2$	5882
$2706 \pm 2$	6383	$2472 \pm 2$	5852
$2688 \pm 2$	6334	$2210 \pm 2$	5401
$2676 \pm 2$	6305	$2168 \pm 2$	5341
$2662 \pm 2$	6267	$2162 \pm 2$	5331
$2638 \pm 2$	6217		

Таблица 1: Градуировочная таблица монохроматора

### 3.2 Исследование зависимости тока фототока от напряжения на аноде

Для определения диапазона дальнейших измерений грубо исследуем зависимость по всей области при  $\lambda = 6239 \text{ \AA}$ . В работе измерялся не фототок напрямую, а пропорциональное ему напряжение  $U_i$ . Результат на рис. 5. Оптимальным для более точных измерений является участок до  $U \approx 1 \text{ В}$ .

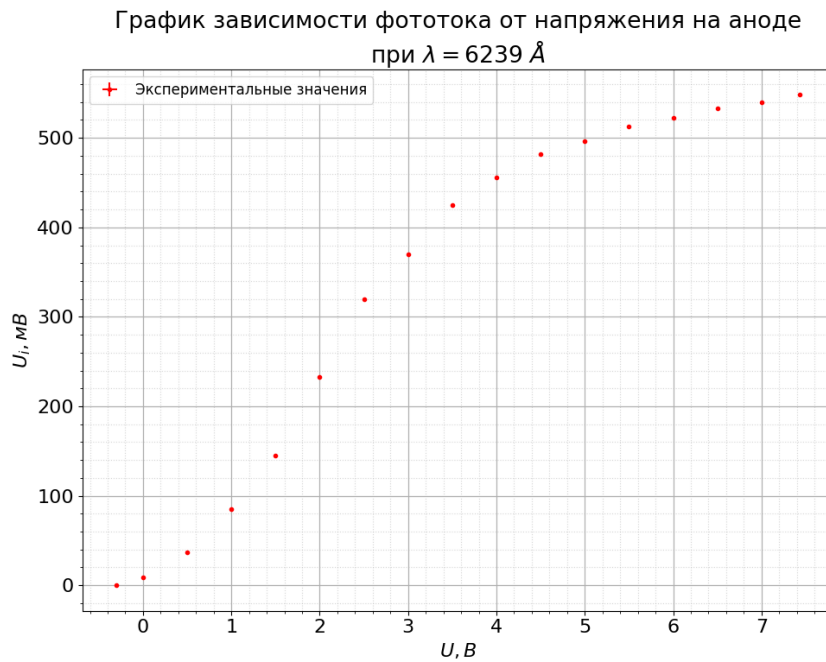


Рис. 5: График зависимости фототока от напряжения на аноде

### 3.3 Определение потенциала запираания для разных длин волн путём экстраполяции

Построим графики зависимости  $\sqrt{U_i} = f(U)$ , которые аппроксимируем прямыми и экстраполируем до пересечения с осью абсцисс. Таким образом получим потенциалы запираания. Полные результаты на графиках и в таблицах в приложении. Кратко результаты представлены на рис. 6 и в таблице 2.

Погрешность измерения  $U$  равна  $0.0001 \text{ В}$ ,  $U_i - 1 \text{ мВ}$ .

При аппроксимации методом наименьших квадратов были использованы не все измеренные точки, а только 5-6 наиболее близких к 0, так как далее линейность зависимости сильно нарушается

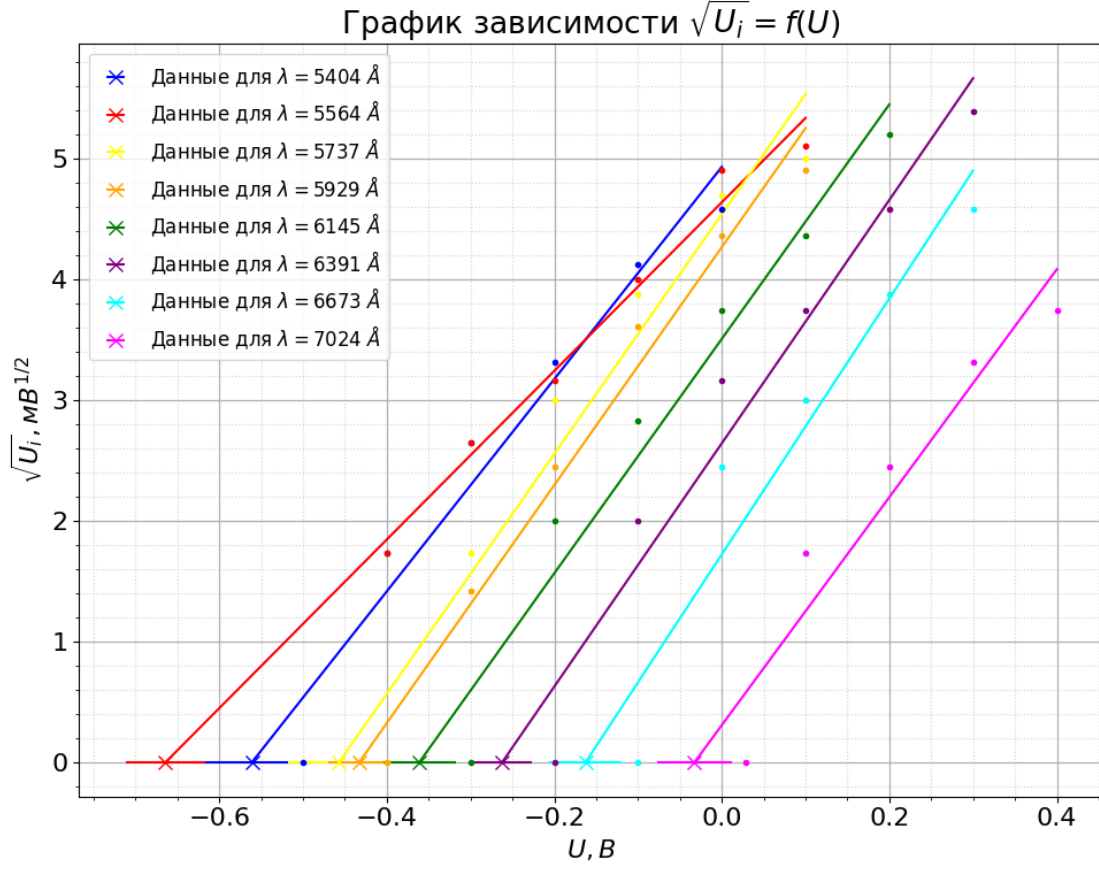


Рис. 6: Графики зависимости корня фототока от анодного напряжения, аппроксимация

$\theta$	$\lambda, \text{\AA}$	$\omega, 10^{15} \text{ рад/с}$	$k, 10^{-3} \text{ В}^{-1/2}$	$b, \text{ В}^{1/2}$	$U_0, \text{ В}$
$2210 \pm 2$	$5404 \pm 11$	$3.488 \pm 0.007$	$8.8 \pm 1.0$	$4.9 \pm 0.3$	$0.56 \pm 0.07$
$2310 \pm 2$	$5564 \pm 11$	$3.388 \pm 0.006$	$7.0 \pm 0.5$	$4.64 \pm 0.11$	$0.66 \pm 0.05$
$2410 \pm 2$	$5737 \pm 10$	$3.285 \pm 0.006$	$10 \pm 1$	$4.5 \pm 0.3$	$0.46 \pm 0.06$
$2510 \pm 2$	$5929 \pm 10$	$3.179 \pm 0.005$	$9.9 \pm 0.7$	$4.3 \pm 0.2$	$0.43 \pm 0.04$
$2610 \pm 2$	$6145 \pm 10$	$3.067 \pm 0.005$	$10 \pm 1$	$3.5 \pm 0.2$	$0.36 \pm 0.04$
$2710 \pm 2$	$6391 \pm 10$	$2.949 \pm 0.004$	$10 \pm 1$	$2.6 \pm 0.2$	$0.26 \pm 0.04$
$2810 \pm 2$	$6673 \pm 9$	$2.825 \pm 0.004$	$11 \pm 2$	$1.7 \pm 0.3$	$0.16 \pm 0.04$
$2918 \pm 2$	$7025 \pm 9$	$2.683 \pm 0.004$	$9 \pm 2$	$0.3 \pm 0.4$	$0.03 \pm 0.04$

Таблица 2: Таблица результатов запирающих потенциалов

При помощи следующей формулы находим  $U_0$ :

$$U_0 = \frac{-b}{k}$$

### 3.4 Определение постоянной Дирака по полученным данным

При помощи графика  $U_0 = f(\omega)$  на рис. 7 ( $y = k * x + b$ ) можно определить постоянную Дирака. По МНК  $k = (7.2 \pm 0.8) * 10^{-16} \text{ В} * \text{с}$ ;  $b = (-1.9 \pm 0.2) \text{ В}$ .

$$\hbar = \frac{dU_0}{d\omega} * e = k * e = (7.2 \pm 0.8) * 10^{-16} \text{ эВ} * \text{с}$$

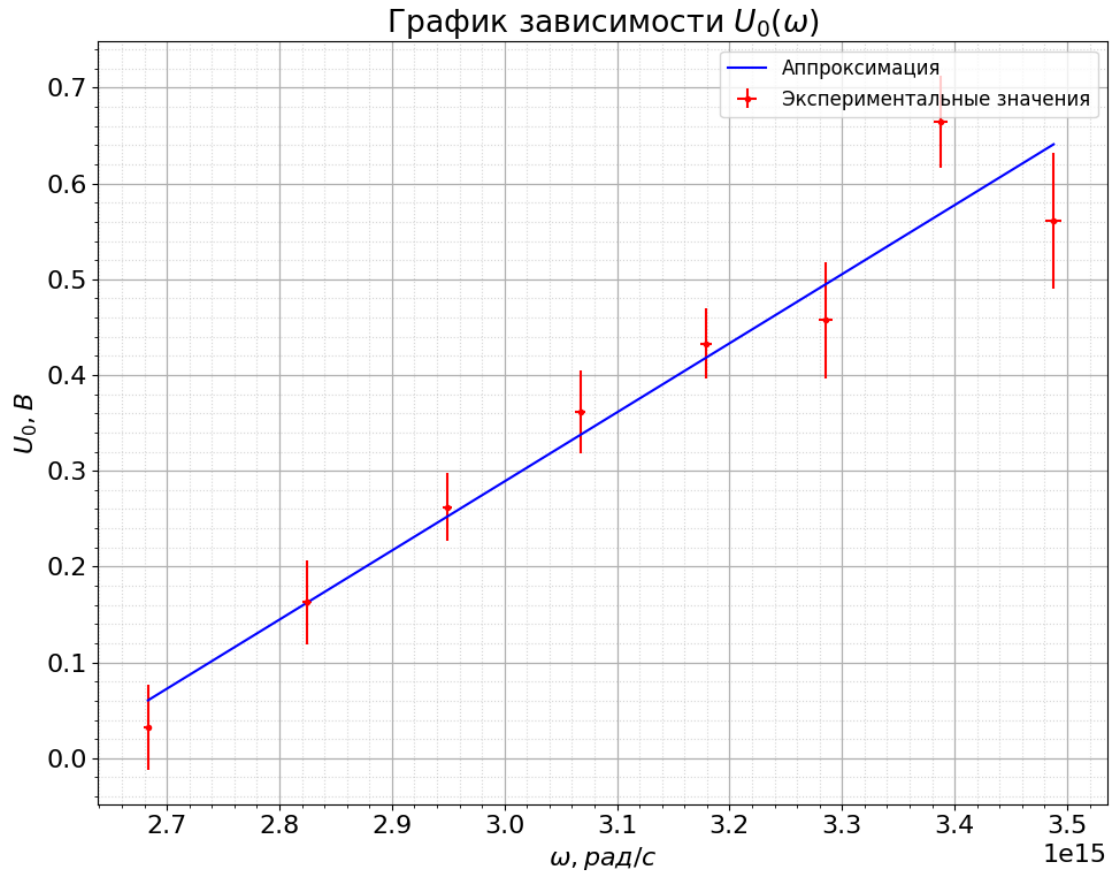


Рис. 7: График зависимости запирающего напряжения от угловой частоты волны падающего света

Точка пересечения графика с осью абсцисс отражает красную границу фотоэффекта. Из формулы (4) можем определить работу выхода материала. Однако данные величины могут быть найдены только с точностью до контактной разницы потенциалов.

$$W = -b * e = (1.9 \pm 0.2) \text{ эВ}$$

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{-b}{k} = (2.6 \pm 0.4) * 10^{15} \text{ рад/с}$$

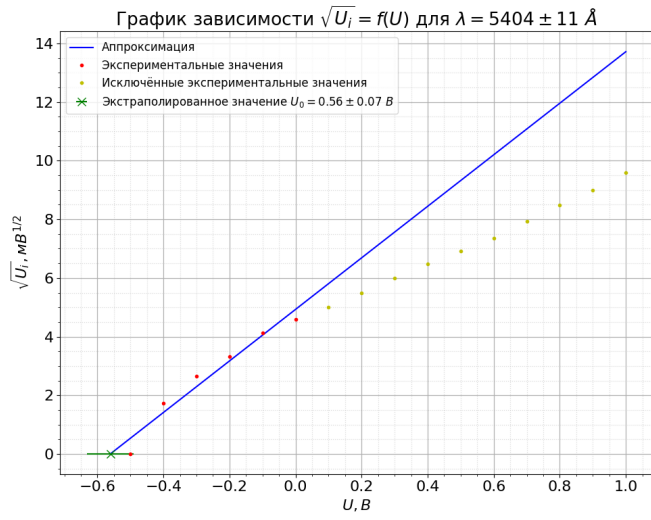
## 4 Вывод

Экспериментально получили постоянную Дирака  $\hbar = (7.2 \pm 0.8) * 10^{-16} \text{ эВ} * \text{с}$ . Результат совпал с табличным ( $6.582 * 10^{-16} \text{ эВ} * \text{с}$ ) с точностью до погрешности.

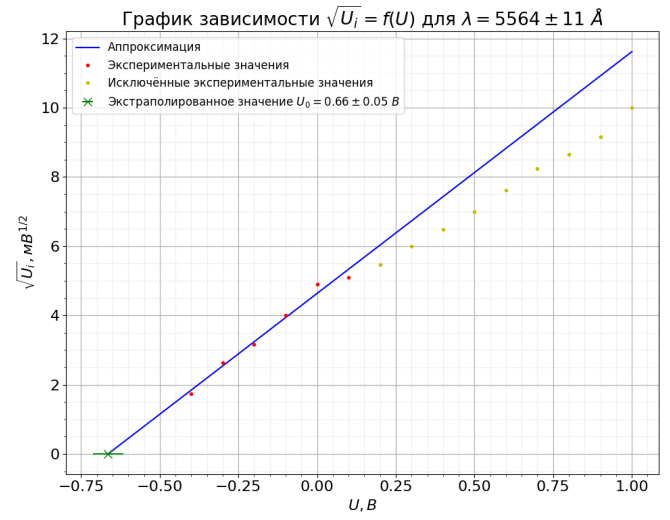
Полученное значение красной границы  $\omega_{\text{кр}} = (2.6 \pm 0.8) * 10^{15} \text{ рад/с}$  почти совпало с табличным для  $Na_2KSb(Cs)$  ( $2.09 * 10^{15} \text{ рад/с}$ ). Различие объясняется тем, что данная величина была получена с точностью до контактной разницы потенциалов.

Получили значение работы выхода  $W = (1.9 \pm 0.2) \text{ эВ}$ .

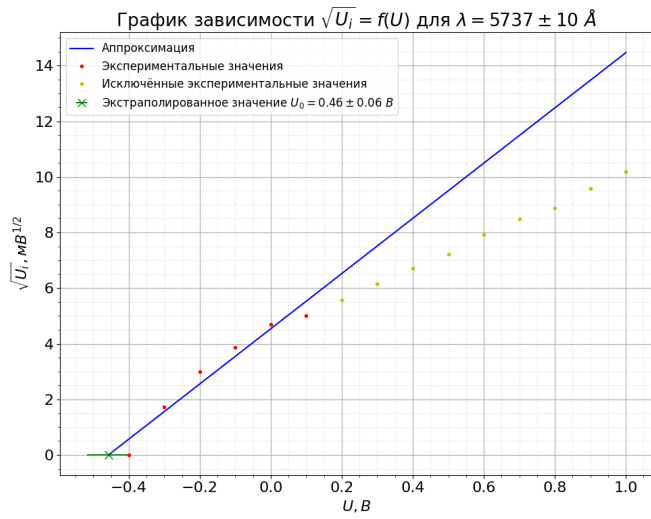
## 5 Приложение



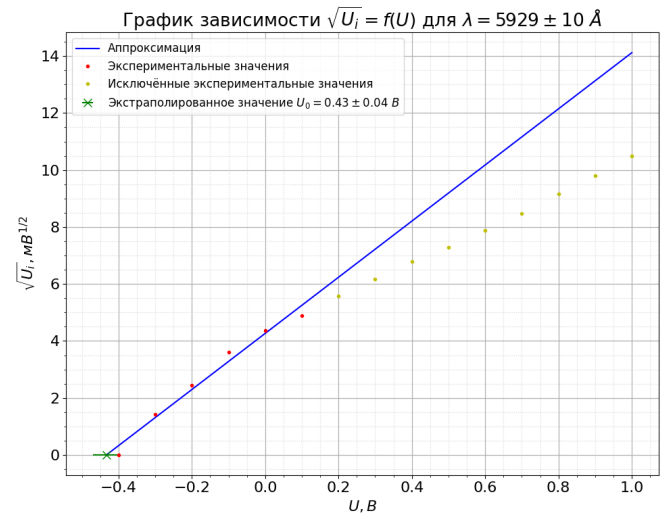
(a)



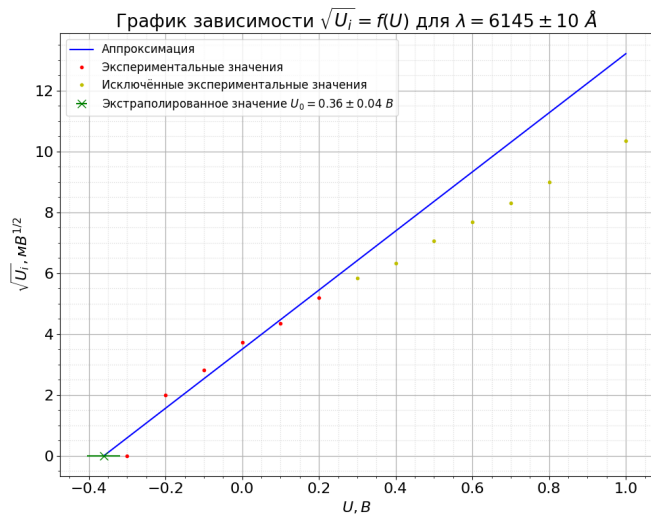
(b)



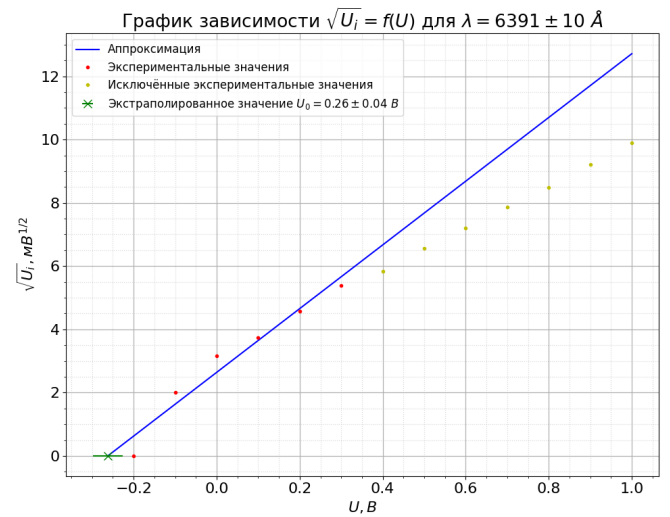
(a)



(b)

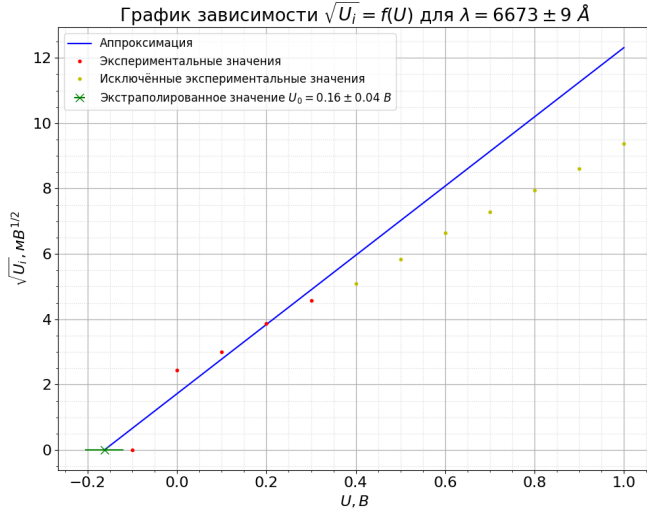


(a)

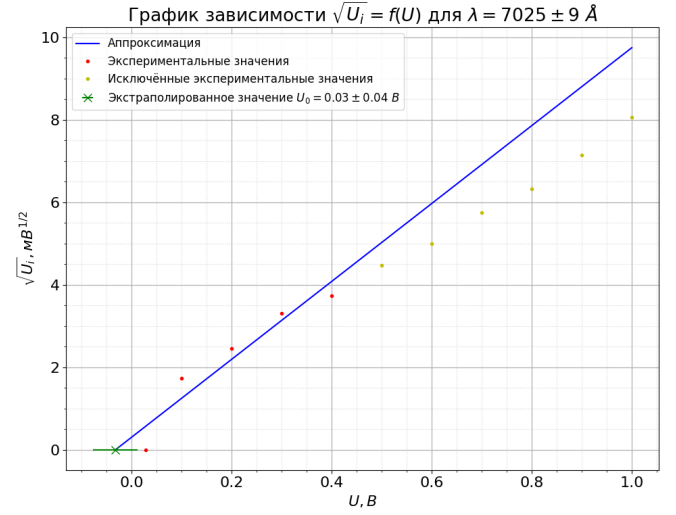


(b)





(a)



(b)

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	92	$9.59 \pm 0.05$
0.9000	81	$9.00 \pm 0.06$
0.8000	72	$8.49 \pm 0.06$
0.7000	63	$7.94 \pm 0.06$
0.6000	54	$7.35 \pm 0.07$
0.5000	48	$6.93 \pm 0.07$
0.4000	42	$6.48 \pm 0.08$
0.3000	36	$6.00 \pm 0.08$
0.2000	30	$5.48 \pm 0.09$
0.1000	25	$5.00 \pm 0.10$
0.0000	21	$4.58 \pm 0.11$
-0.1000	17	$4.12 \pm 0.12$
-0.2000	11	$3.3 \pm 0.2$
-0.3000	7	$2.6 \pm 0.2$
-0.4000	3	$1.7 \pm 0.3$
-0.5000	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 3: Результаты измерений для  $\lambda = 5404 \pm 11 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	100	$10.00 \pm 0.05$
0.9000	84	$9.17 \pm 0.05$
0.8000	75	$8.66 \pm 0.06$
0.7000	68	$8.25 \pm 0.06$
0.6000	58	$7.62 \pm 0.07$
0.5000	49	$7.00 \pm 0.07$
0.4000	42	$6.48 \pm 0.08$
0.3000	36	$6.00 \pm 0.08$
0.2000	30	$5.48 \pm 0.09$
0.1000	26	$5.099 \pm 0.098$
0.0000	24	$4.90 \pm 0.10$
-0.1000	16	$4.00 \pm 0.12$
-0.2000	10	$3.2 \pm 0.2$
-0.3000	7	$2.6 \pm 0.2$
-0.4000	3	$1.7 \pm 0.3$

Таблица 4: Результаты измерений для  $\lambda = 5564 \pm 11 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	104	$10.20 \pm 0.05$
0.9000	92	$9.59 \pm 0.05$
0.8000	79	$8.89 \pm 0.06$
0.7000	72	$8.49 \pm 0.06$
0.6000	63	$7.94 \pm 0.06$
0.5000	52	$7.21 \pm 0.07$
0.4000	45	$6.71 \pm 0.07$
0.3000	38	$6.16 \pm 0.08$
0.2000	31	$5.57 \pm 0.09$
0.1000	25	$5.00 \pm 0.10$
0.0000	22	$4.69 \pm 0.11$
-0.1000	15	$3.87 \pm 0.13$
-0.2000	9	$3.0 \pm 0.2$
-0.3000	3	$1.7 \pm 0.3$
-0.4000	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 5: Результаты измерений для  $\lambda = 5737 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	110	$10.49 \pm 0.05$
0.9000	96	$9.80 \pm 0.05$
0.8000	84	$9.17 \pm 0.05$
0.7000	72	$8.49 \pm 0.06$
0.6000	62	$7.87 \pm 0.06$
0.5000	53	$7.28 \pm 0.07$
0.4000	46	$6.78 \pm 0.07$
0.3000	38	$6.16 \pm 0.08$
0.2000	31	$5.57 \pm 0.09$
0.1000	24	$4.90 \pm 0.10$
0.0000	19	$4.36 \pm 0.11$
-0.1000	13	$3.6 \pm 0.1$
-0.2000	6	$2.4 \pm 0.2$
-0.3000	2	$1.4 \pm 0.4$
-0.4000	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 6: Результаты измерений для  $\lambda = 5929 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	88	$9.38 \pm 0.05$
0.9000	74	$8.60 \pm 0.06$
0.8000	63	$7.94 \pm 0.06$
0.7000	53	$7.28 \pm 0.07$
0.6000	44	$6.63 \pm 0.08$
0.5000	34	$5.83 \pm 0.09$
0.4000	26	$5.099 \pm 0.098$
0.3000	21	$4.58 \pm 0.11$
0.2000	15	$3.87 \pm 0.13$
0.1000	9	$3.0 \pm 0.2$
0.0000	6	$2.4 \pm 0.2$
-0.1000	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 9: Результаты измерений для  $\lambda = 6673 \pm 9 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	107	$10.34 \pm 0.05$
0.8000	81	$9.00 \pm 0.06$
0.7000	69	$8.31 \pm 0.06$
0.6000	59	$7.68 \pm 0.07$
0.5000	50	$7.07 \pm 0.07$
0.4000	40	$6.32 \pm 0.08$
0.3000	34	$5.83 \pm 0.09$
0.2000	27	$5.20 \pm 0.10$
0.1000	19	$4.36 \pm 0.11$
0.0000	14	$3.7 \pm 0.1$
-0.1000	8	$2.8 \pm 0.2$
-0.2000	4	$2.0 \pm 0.2$
-0.3000	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 7: Результаты измерений для  $\lambda = 6145 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	98	$9.90 \pm 0.05$
0.9000	85	$9.22 \pm 0.05$
0.8000	72	$8.49 \pm 0.06$
0.7000	62	$7.87 \pm 0.06$
0.6000	52	$7.21 \pm 0.07$
0.5000	43	$6.56 \pm 0.08$
0.4000	34	$5.83 \pm 0.09$
0.3000	29	$5.39 \pm 0.09$
0.2000	21	$4.58 \pm 0.11$
0.1000	14	$3.7 \pm 0.1$
0.0000	10	$3.2 \pm 0.2$
-0.1000	4	$2.0 \pm 0.2$
-0.2000	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 8: Результаты измерений для  $\lambda = 6391 \pm 10 \text{ \AA}$

$U, \text{В}$	$U_i, \text{мВ}$	$\sqrt{U_i}, \text{мВ}^{1/2}$
1.0000	65	$8.06 \pm 0.06$
0.9000	51	$7.14 \pm 0.07$
0.8000	40	$6.32 \pm 0.08$
0.7000	33	$5.74 \pm 0.09$
0.6000	25	$5.00 \pm 0.10$
0.5000	20	$4.47 \pm 0.11$
0.4000	14	$3.7 \pm 0.1$
0.3000	11	$3.3 \pm 0.2$
0.2000	6	$2.4 \pm 0.2$
0.1000	3	$1.7 \pm 0.3$
0.0280	0	$0.0 \pm 1.0$

Таблица 10: Результаты измерений для  $\lambda = 7025 \pm 9 \text{ \AA}$