



Московский Физико-Технический Институт
(национальный исследовательский университет)

Отчет по эксперименту

Определение удельного заряда электрона

Работа №3.3.1; дата: 18.11.22

Семестр: 3

Выполнил:
Кошелев Александр

Группа:
Б05-105

А. Метод магнитной фокусировки

1. Аннотация

Цель работы:

Определение значения магнитных полей, при которых происходит фокусировка электронного пучка, и по результатам измерений считать удельный заряд электрона e/m .

Схема установки:



Рис. 1: Схема установки

Основной частью установки является электронный осциллограф, трубка которого вынута и установлена в длинном соленоиде, создающим магнитное поле. Напряжение на отклоняющие пластины и питание подводятся к трубке многожильным кабелем.

Пучок электронов, вылетающих из катода с разными скоростями, ускоряется анодным напряжением. Пропустив пучок сквозь две узкие диафрагмы, можно выделить электроны с практически одинаковой продольной скоростью. Небольшое переменное напряжение, поступающее с клеммы "Контрольный сигнал" осциллографа на отклоняющие пластины, изменяет только поперечную составляющую скорости. При увеличении магнитного поля линия на экране стягивается в точку, а затем снова удлиняется.

Магнитное поле создается постоянным током, величина которого регулируется ручками источника питания и измеряется амперметром. Ключ служит для изменения направления поля в соленоиде.

Величина магнитного поля определяется с помощью милливеберметра.

На точность результатов может влиять внешнее магнитное поле, особенно продольное.

Измерения магнитного поля с помощью милливеберметра обычно проводятся в предварительных опыта: при отключении ключа устанавливается связь между силой тока и индукцией магнитного поля в соленоиде.

В работе используются:

Электронно-лучевая трубка и блок питания к ней; источник постоянного тока; соленоид; электростатический вольтметр; милливеберметр; ключи.

2. Теоретическая справка

В постоянном однородном магнитном поле траектории заряженных частиц представляют собой спирали, радиус которых определяется формулой (3.4). За время $T_B = \frac{2\pi r_B}{v_\perp}$, которое можно назвать **циклотронным периодом**, заряд сместится вдоль магнитного поля на расстояние L (шаг спирали):

$$L = v_\parallel T_B = \frac{2\pi v \cos \alpha}{\frac{e}{m} B}, \quad (1)$$

где α — угол между вектором скорости \mathbf{v} и направлением поля \mathbf{B} . Если углы малы, $\alpha \ll 1$, то $\cos \alpha \approx 1$ и

$$L \approx \frac{2\pi v}{\frac{e}{m} B}. \quad (2)$$

Таким образом, при малых углах расстояние L не зависит от α , так что все электроны, вышедшие из одной точки, после одного оборота вновь соберутся в одной точке — *сфокусируются*. Как следует из (2), индукция поля B , при которой точка фокусировки отстоит от точки вылета на расстоянии L , определяется величиной e/m — **удельным зарядом частицы**.

$$v_\parallel = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}},$$

следующего из закона сохранения энергии.

В магнитном поле соленоида коллимированные электроны будут двигаться по спиралям практически с одним и тем же шагом L (см. формулу (1)) и, следовательно, будут встречаться вновь, пересекая ось пучка на расстояниях nL , $n = 1, 2, 3, \dots$. В этих точках сечение пучка будет наименьшим, и при изменении магнитного поля изображение пучка на экране будет периодически стягиваться в ярко светящуюся точку. Таким образом, удельный заряд может быть получен из соотношения

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{L^2} \cdot \frac{n^2}{B_\Phi^2(n)}. \quad (3)$$

Эта формула и лежит в основе экспериментального измерения удельного заряда электрона *методом магнитной фокусировки*.

3. Ход работы

Занесем в таблицу параметры установки.

Величина	Значение
V , кВ	0,78
l , м	0,265
SN , м ²	0,3

Таблица 1. Параметры установки.

Для начала стоит определить связь между индукцией B магнитного поля в соленоиде и током I через обмотки магнита. Для этого снимем зависимость магнитного потока $\Phi = BSN$ от тока I .

I , А	σ_I , А	Φ , мВб	σ_Φ , мВб
0,26	0,01	0,4	0,1
0,41	0,01	0,6	0,1
0,79	0,01	1,2	0,1
1,01	0,01	1,4	0,1
1,49	0,01	2,0	0,1
2,28	0,01	3,1	0,1
2,54	0,01	3,5	0,1
3,06	0,01	4,2	0,1
3,53	0,01	4,9	0,1

Табл. 2: Зависимость $\Phi(I)$ в прямом направлении.

$\Phi(I)$ в прямом направлении

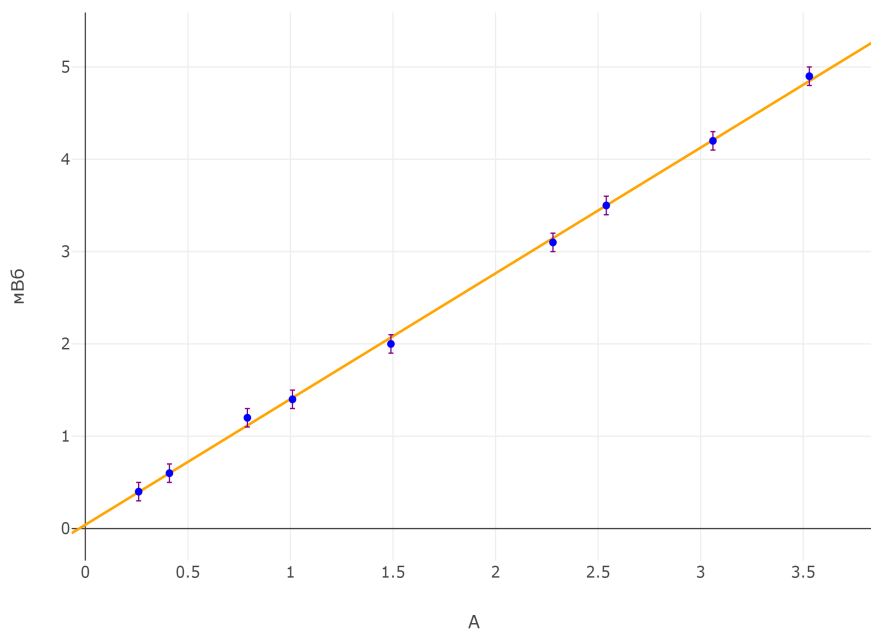


Рис. 2: $\Phi(I)$ в прямом направлении.

$I, \text{ A}$	$\sigma_I, \text{ A}$	$\Phi, \text{ мВб}$	$\sigma_\Phi, \text{ мВб}$
0,26	0,01	0,3	0,1
0,41	0,01	0,5	0,1
0,79	0,01	1,1	0,1
1,01	0,01	1,3	0,1
1,49	0,01	2,0	0,1
2,28	0,01	3,2	0,1
2,54	0,01	3,5	0,1
3,06	0,01	4,2	0,1
3,53	0,01	4,8	0,1

Табл. 3: Зависимость $\Phi(I)$ в обратном направлении.

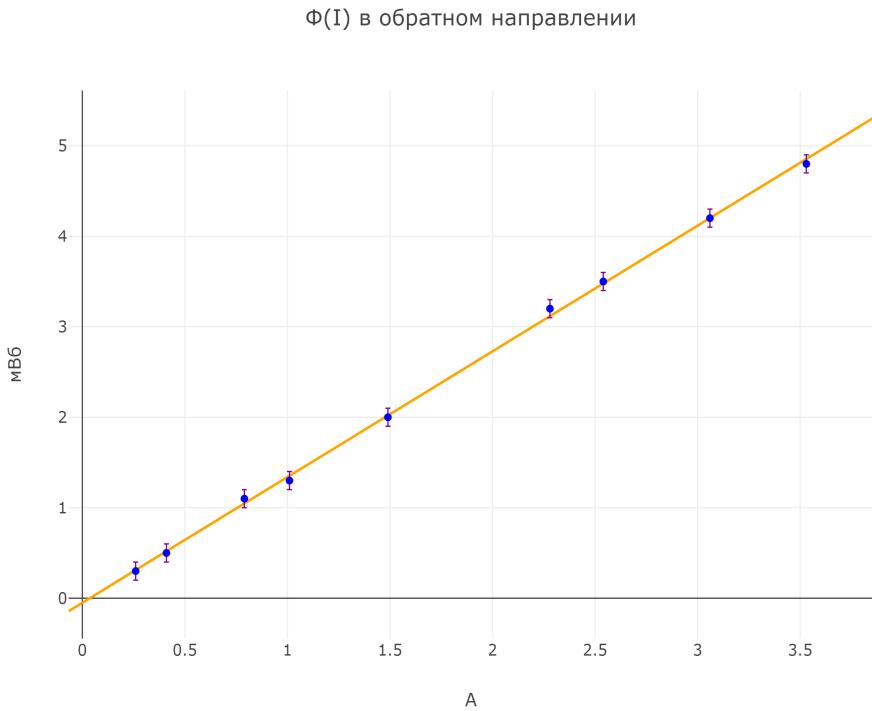


Рис. 3: $\Phi(I)$ в обратном направлении.

Графики $\Phi(I)$ подчиняются линейным зависимостям с коэффициентами $\alpha_1 = (1,36 \pm 0,03) \frac{\text{мВб}}{\text{А}}$ и $\alpha_2 = (1,39 \pm 0,03) \frac{\text{мВб}}{\text{А}}$. Теперь будем увеличивать постепенно ток и найдем ток при каждом фокусе, так как мы знаем зависимость $\Phi = \Phi(I)$ для каждого направления, то мы можем определить зависимость $B_\Phi = f(n)$. При этом можно считать, что $\sigma_{B_\Phi} = B_\Phi \cdot \varepsilon_{alpha}$

В прямом направлении					В обратном направлении				
n	$I_\Phi, \text{ A}$	$\sigma_{I_\Phi}, \text{ A}$	$B_\Phi, \text{ мТл}$	$\sigma_{B_\Phi}, \text{ мТл}$	n	$I_\Phi, \text{ A}$	$\sigma_{I_\Phi}, \text{ A}$	$B_\Phi, \text{ мТл}$	$\sigma_{B_\Phi}, \text{ мТл}$
1	0,55	0,01	2,63	0,26	1	0,55	0,01	2,38	0,25
2	1,09	0,01	5,07	0,31	2	1,09	0,01	4,88	0,30
3	1,65	0,01	7,61	0,37	3	1,68	0,01	7,62	0,36
4	2,15	0,01	9,88	0,42	4	2,28	0,01	10,40	0,42
5	2,69	0,01	12,33	0,47	5	2,79	0,01	12,76	0,47

Табл. 4: Зависимость $B_\Phi = f(I)$.

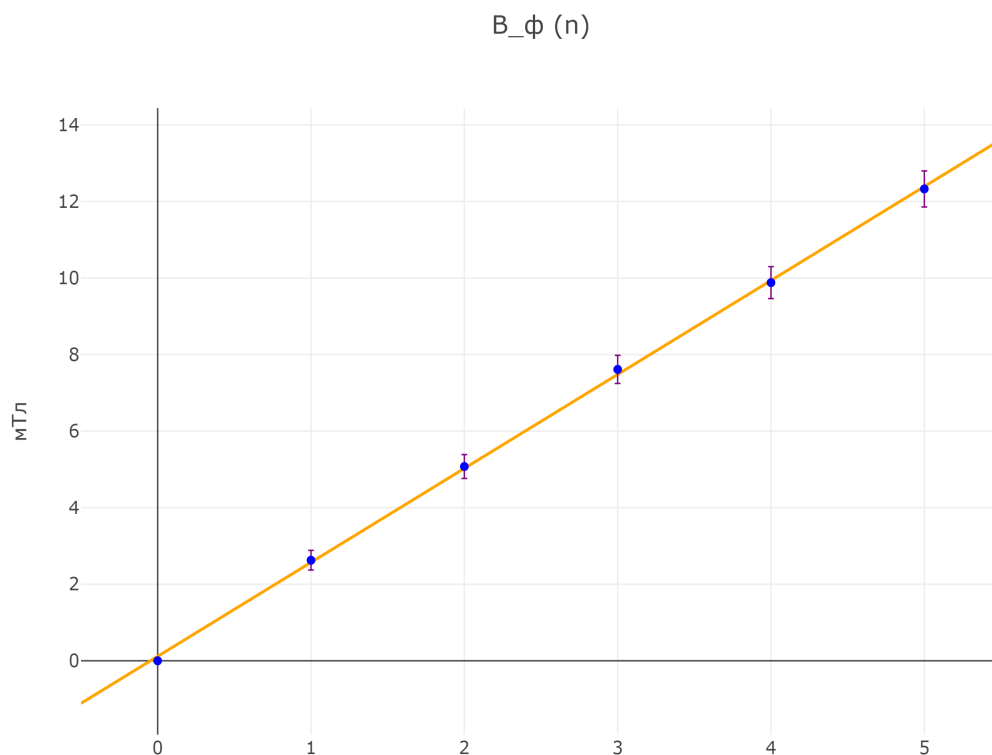


Рис. 4: $B_{\Phi} = f(I)$ в прямом направлении.

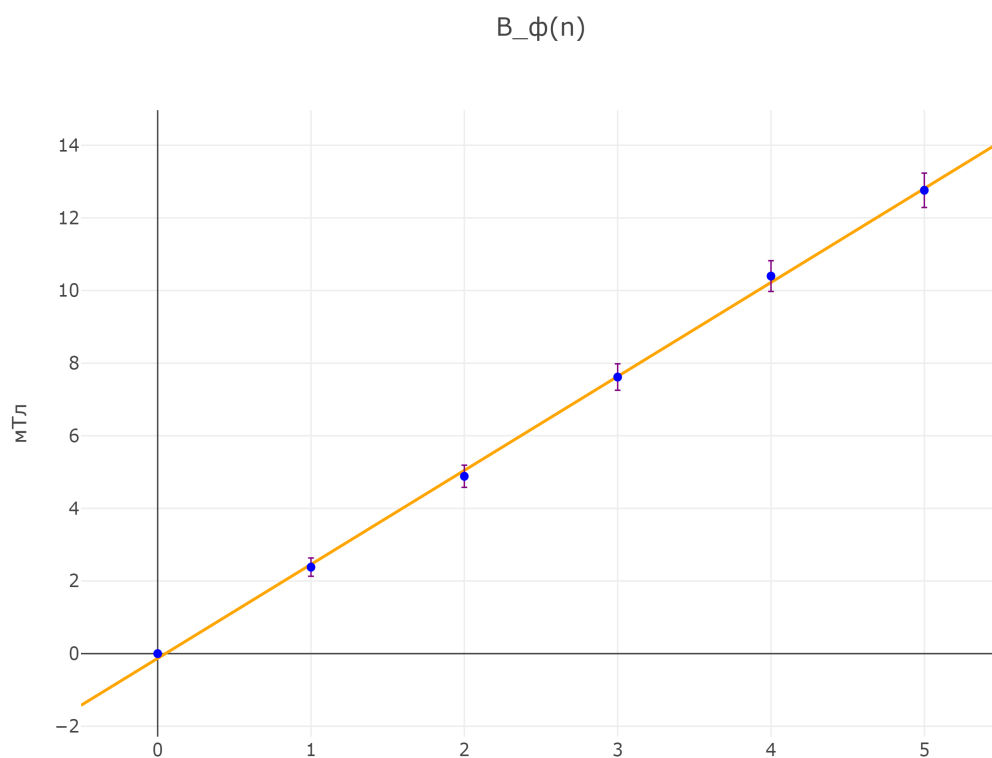


Рис. 5: $B_{\Phi} = f(I)$ в обратном направлении.

Угловые коэффициенты $k_1 = 2,46 \pm 0,05$ мТл, $k_2 = 2,59 \pm 0,07$ мТл. Угловые коэффициенты совпадают в рамках погрешности. Возьмем усредненное значение $k = 2,54 \pm 0,13$ мТл.

В итоге, подставив в формулу (3) мы получаем, что

$$\frac{e}{m} = (1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}, \varepsilon = 0,1$$

4. Выводы

В данной работе мы нашли значения магнитных полей при которых происходит фокусировка электронного пучка и по ним рассчитали значение удельного заряда и получили: $e/m = (1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$. Это значение близко к реальному $e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

В. Метод магнетрона

1. Аннотация

Цель работы:

Исследование зависимости анодного тока от тока, протекающего через соленоид при различных напряжениях на аноде лампы и по результатам измерений рассчитать удельный заряд электрона e/m .

Схема установки:

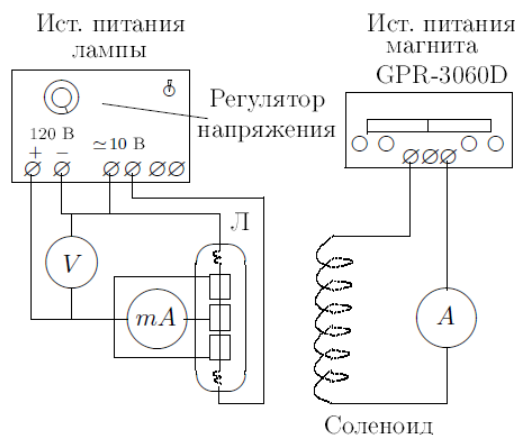


Рис. 6: Схема установки

Два крайних цилиндра изолированы от среднего небольшими зазорами и используются для устранения краевых эффектов на торцах среднего цилиндра, ток с которого используется при измерениях. В качестве катода используется тонкая вольфрамовая проволока. Катод разогревается переменным током, отбираемым от стабилизированного источника питания.

С этого же источника на анод лампы подается напряжение, регулируемое с помощью потенциометра и измеряемое вольтметром.

Индукция магнитного поля в соленоиде рассчитывается по току I_m , протекающему через обмотку соленоида. Коэффициент пропорциональности между ними указан в установке.

Лампа закреплена в соленоиде. Магнитное поле в соленоиде создается постоянным током, сила которого регулируется ручками источника питания и измеряется амперметром.

В работе используются:

Электронная лампа с цилиндрическим анодом; соленоид; источники питания лампы и соленоида; вольтметр постоянного тока; миллиамперметр, амперметр.

2. Теоретическая справка

Рассчитаем критическое магнитное поле для плоского конденсатора. Движение электрона будет иметь характер электрического дрейфа. Если начальная скорость равна нулю (начальные условия $x(0) = y(0) = 0$, $v_x(0) = v_y(0) = 0$), то, как следует из уравнений (3.5), траектория частицы будет *циклоидой*:

$$x = Vt - R \sin \omega_B t, \quad y = R(1 - \cos \omega_B t), \quad (4)$$

где $V = E/B$ — дрейфовая скорость, $R = V/\omega_B = Em/(eB^2)$. Касание анода происходит при $2R = h$ (h — расстояние между анодом и катодом). Этому значению соответствует критическое поле

$$B_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{2U}}{h\sqrt{e/m}}, \quad (5)$$

где $U = Eh$ — напряжение между пластинами. Отсюда находим удельный заряд:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B_{\text{кр}}^2 h^2}. \quad (6)$$

Здесь удельный заряд электрона определяется по формуле

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8V_a}{B_{\text{кр}}^2 r_a^2}$$

где V_a — анодное напряжение, $B_{\text{кр}}$ — критическое поле, r_a — радиус анода.

3. Ход работы

Запишем параметры установки в таблицу

Величина	Значение
K , Тл/А	$2,8 \cdot 10^{-2}$
r_a , мм	12

Табл. 5: Параметры установки

Снимем зависимость анодного тока от тока через соленоид для различных значений V_a . $\sigma_{I_m} = 1 \text{ y.e.} = 4 \text{ мА}$, $\sigma_{I_a} = 1 \text{ y.e.} = 4 \text{ мкА}$

I_m , у.е.	I_a , у.е.
0	104
20	104
23	99
25	100
27	98
28	92
30	87
34	80
38	64
40	55
43	37
66	0
75	0

Табл. 6: Зависимость $I_a(B)$ для $V_a = 70$ В.

I_m , у.е.	I_a , у.е.
0	107
20	107
32	96
41	78
46	61
48	50
51	25
63	3
75	0

Табл. 8: Зависимость $I_a(B)$ для $V_a = 90$ В.

I_m , у.е.	I_a , у.е.
0	104
20	104
37	94
46	85
53	59
57	25
75	2

Табл. 10: Зависимость $I_a(B)$ для $V_a = 110$ В.

I_m , у.е.	I_a , у.е.
0	102
20	102
30	92
33	83
38	71
44	51
48	18
71	0
75	0

Табл. 7: Зависимость $I_a(B)$ для $V_a = 80$ В.

I_m , у.е.	I_a , у.е.
0	106
20	108
35	95
44	78
51	51
54	26
64	4
75	0

Табл. 9: Зависимость $I_a(B)$ для $V_a = 100$ В.

I_m , у.е.	I_a , у.е.
0	110
20	109
31	106
46	91
51	76
55	61
58	42
75	2

Табл. 11: Зависимость $I_a(B)$ для $V_a = 120$ В.

Занесем данные из вышеприведенных таблиц в один график.

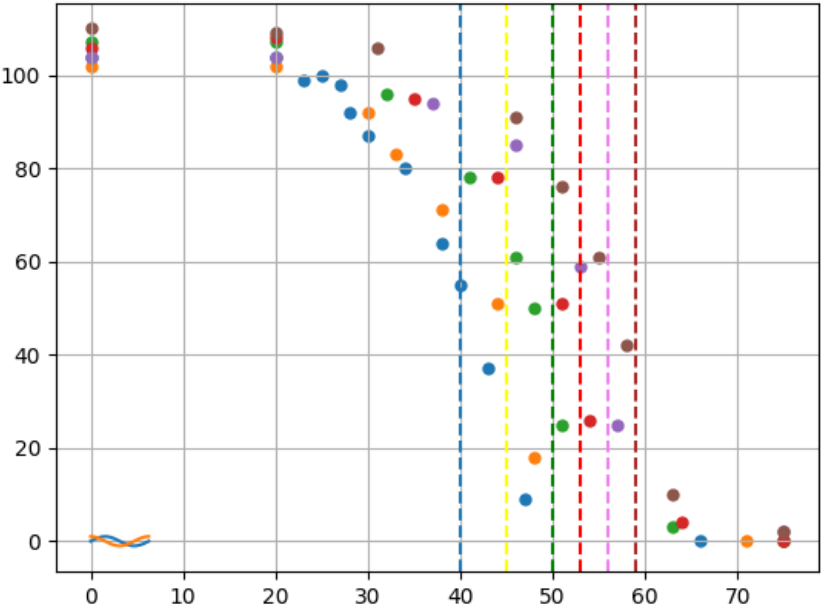


Рис. 7: График для определения $B_{кр}$ в зависимости от V_a .

$B_{кр}$ будем определять по месту наибольшего углового коэффициента наклона прямой. Делать это достаточно трудно, поэтому абсолютную погрешность его определения будем считать равным $\sigma_{I_m} = 3$ у.е. Пересчитаем $B_{кр} = KI_m$, $\varepsilon_{B_{кр}^2} = 2\varepsilon_{I_m}$. По этим данным построим график. Получаем зависимость $B_{кр}^2$ от V_a .

$B_{кр}^2 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}^2$	$V_a, \text{ В}$
$20,1 \pm 3,0$	70
$25,4 \pm 3,4$	80
$31,4 \pm 3,8$	90
$35,2 \pm 4,0$	100
$39,3 \pm 4,2$	110
$43,7 \pm 4,5$	120

Табл. 12: $B_{кр}^2$ от V_a

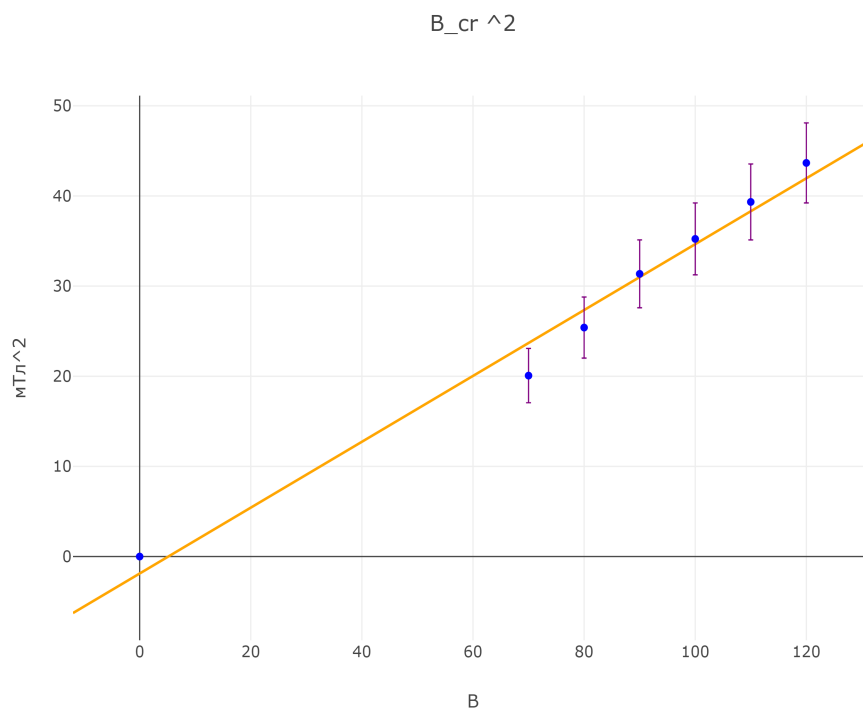


Рис. 8: График зависимости $B_{кр}^2$ от V_a .

По этим данным мы получаем (погрешность углового коэффициента оценена по отклонению от медианной прямой).

$$\frac{e}{m} = (1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{11} \text{Кл/кг}$$

4. Выводы

В данной работе мы исследовали зависимость анодного тока от тока, протекающего через соленоид при различных напряжениях на аноде лампы, и по ней рассчитали значение удельного заряда и получили: $e/m = (1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{11} \text{Кл/кг}$. Это значение также близко к табличному $e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{Кл/кг}$