



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  $\alpha$  — 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  $\alpha$ , 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 <sup>2</sup> | 0,3      |

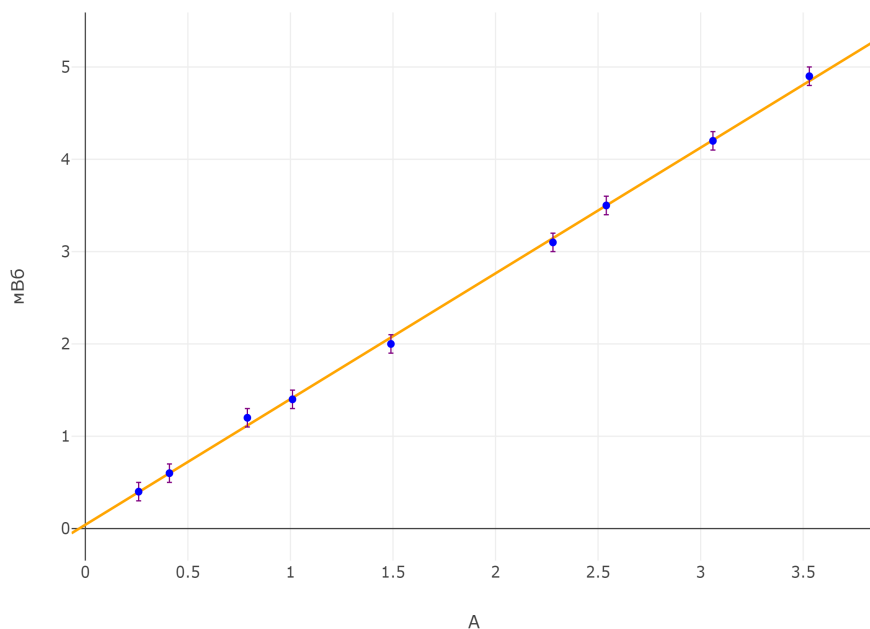
**Таблица 1.** Параметры установки.

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 | $\sigma_I$ , А | $\Phi$ , мВб | $\sigma_\Phi$ , 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.

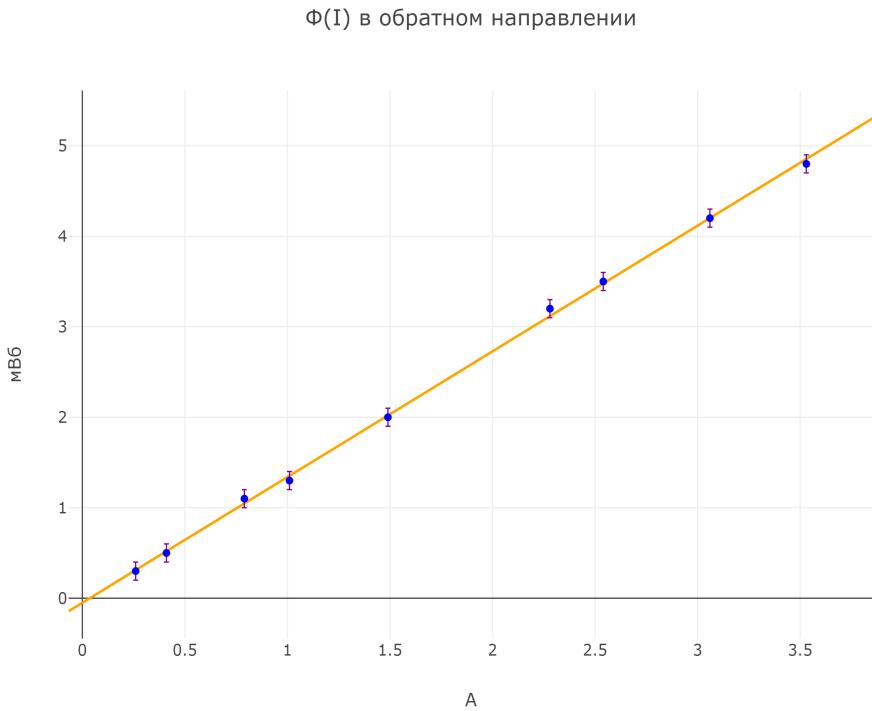
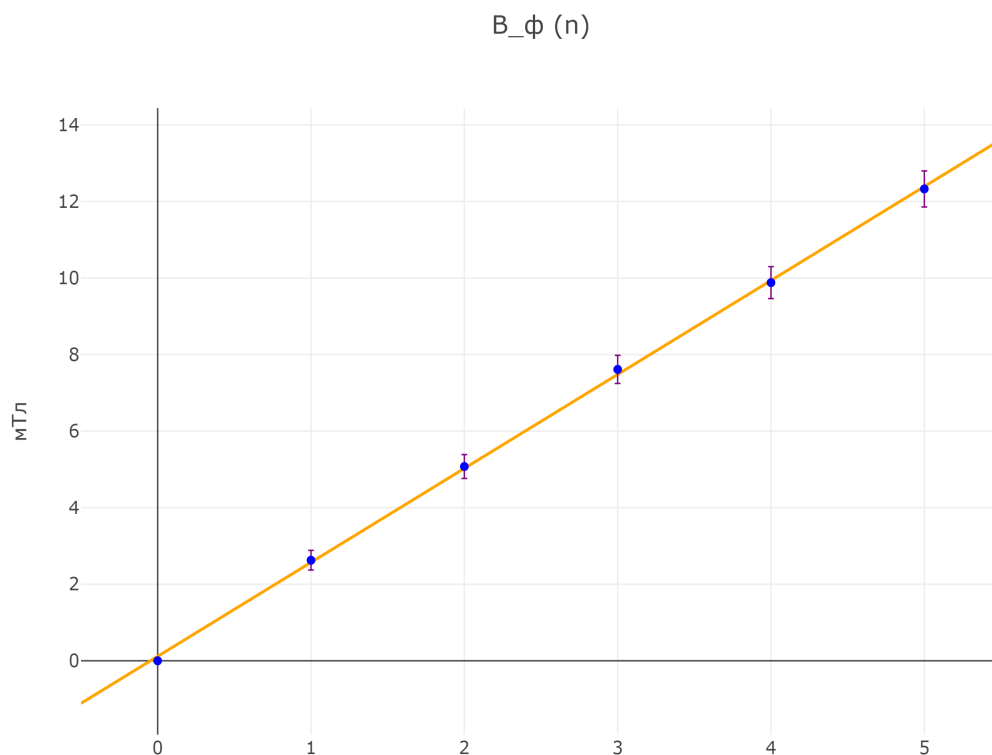


Рис. 3:  $\Phi(I)$  в обратном направлении.

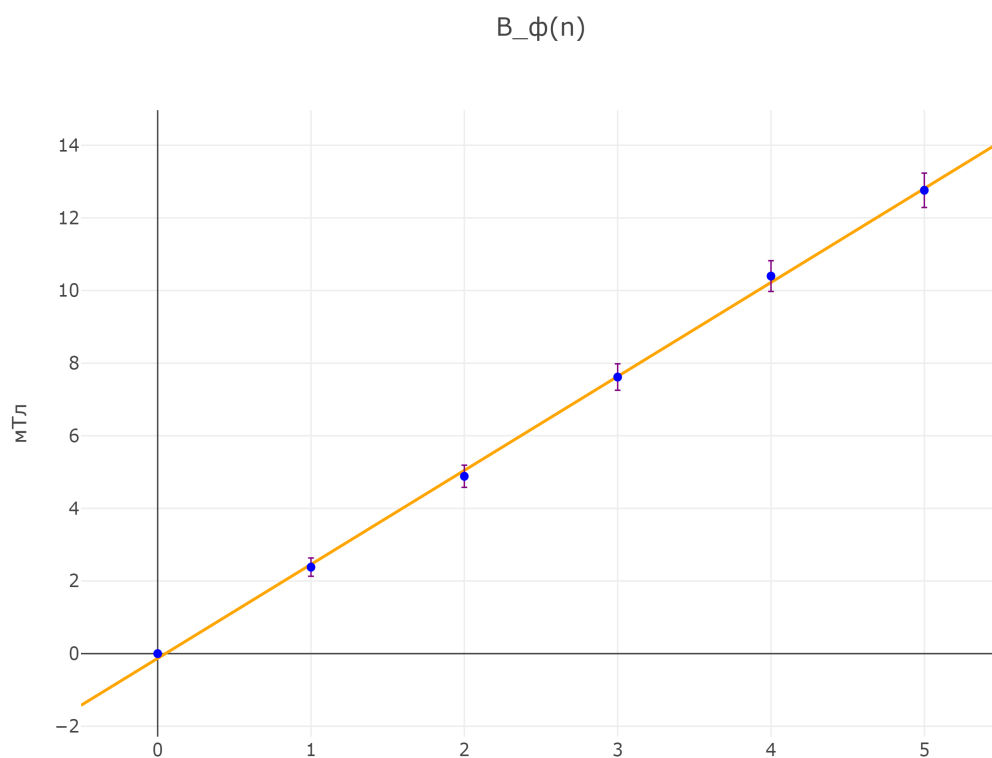
Графики  $\Phi(I)$  подчиняются линейным зависимостям с коэффициентами  $\alpha_1 = (1,36 \pm 0,03) \frac{\text{мВб}}{\text{А}}$  и  $\alpha_2 = (1,39 \pm 0,03) \frac{\text{мВб}}{\text{А}}$ . Теперь будем увеличивать постепенно ток и найдем ток при каждом фокусе, так как мы знаем зависимость  $\Phi = \Phi(I)$  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:

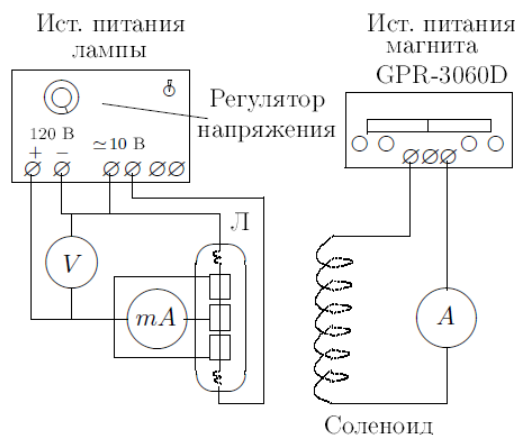


Рис. 6: Схема установки

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.

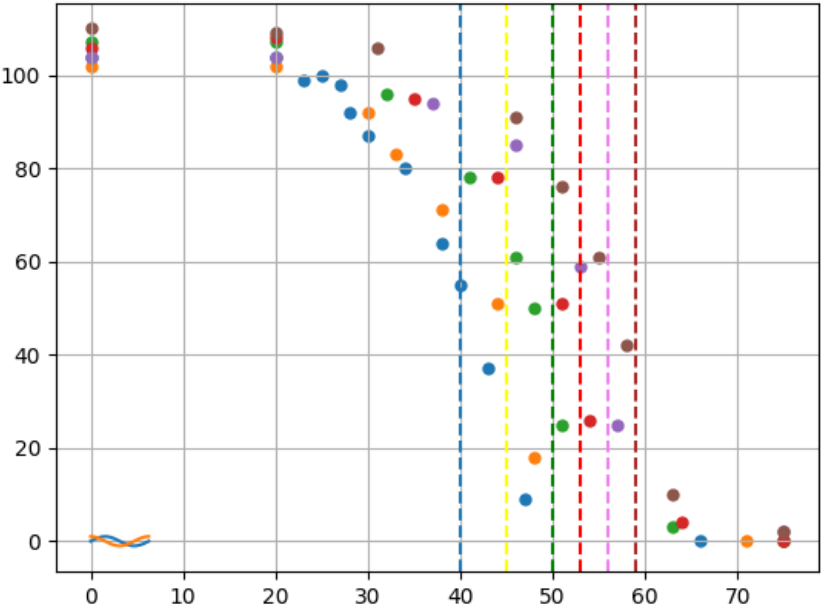
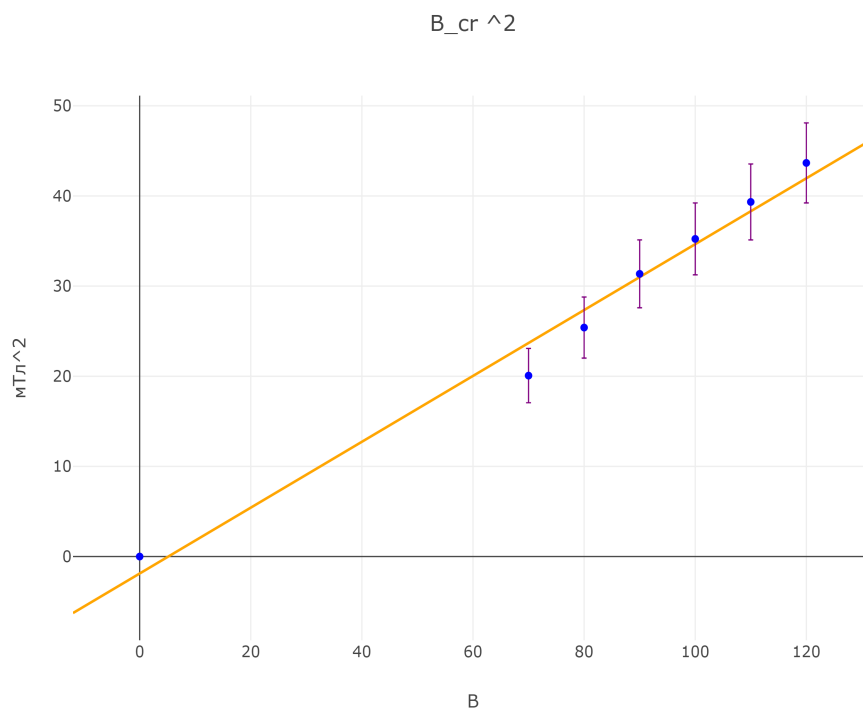


Рис. 7: График для определения  $B_{кр}$  в зависимости от  $V_a$ .

$B_{кр}$  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  $e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{Кл/кг}$