

Федеральное агентство связи
Сибирский Государственный Университет Телекоммуникаций и
Информатики
СибГУТИ
Кафедра физики

Лабораторная работа №4.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ
МАГНЕТРОНА**

Выполнил: студент 1 курса группы ИП-014 Обухов Артем Игоревич

Преподаватель, ведущий занятие: Лубский Виталий Владимирович

Сняты
экспериментальные
данные

_____	_____	_____
дата	подпись	расшифровка

Отчёт принят

_____	_____	_____
дата	подпись	расшифровка

Защита _____
оценка

_____	_____	_____
дата	подпись	расшифровка

Новосибирск, 2020 г.

1. Цель работы

1. Ознакомиться с законами движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.
2. Определить удельный заряд электрона с помощью цилиндрического магнетрона.

2. Основные теоретические сведения

Магнетроном называется электровакуумное устройство, в котором движение электронов происходит во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. Одно из применений магнетрона в том, что он является источником электромагнитного излучения СВЧ диапазона: $f \sim 10^9 \div 10^{12}$ Гц. Магнетрон является основным элементом СВЧ печей (микроволновых печей), магнетроны широко используют в современных радиолокационных станциях. В нашей работе магнетрон имеет самую простую конструкцию и представляет собой радиолампу-диод прямого накала, электродами которой являются коаксиальные цилиндры. Катодом является спираль по оси радиолампы, а анодом - цилиндр вокруг катода, с максимальной эффективностью собирающий эмитированные с катода электроны (рис.1). Радиолампа помещена во внешнее аксиальное магнитное поле, создаваемое соленоидом с током (Образец такого устройства приведен на рис. 2).



Рис. 1 Фотография вакуумного диода Рис.2 Внешний вид магнетрона

Схематическое изображение устройства магнетрона (продольное сечение) представлено на рис.3. При этом силовые линии электрического поля имеют радиальное направление, а линии индукции магнитного поля совпадают с осью электродов. На рис. 4 показано поперечное сечение радиолампы с указанием направлений векторов магнитной индукции B и напряженности электрического поля E . При нагревании катода лампы с его поверхности

начинают вылетать электроны. Это явление называется термоэлектронной эмиссией. Эмитированные электроны движутся к аноду во взаимноперпендикулярных электрическом и магнитном полях (рис.4). Электрическое поле создается между катодом и анодом магнетрона источником анодного напряжения, а магнитное поле – соленоидом (цилиндрической катушкой) с током, внутри которого и находится вакуумный диод. Таким образом, электроны могут двигаться внутри цилиндрического объёма, ограниченного анодом электронной лампы.

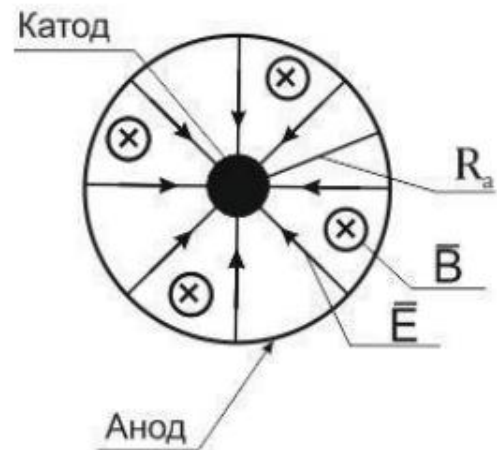
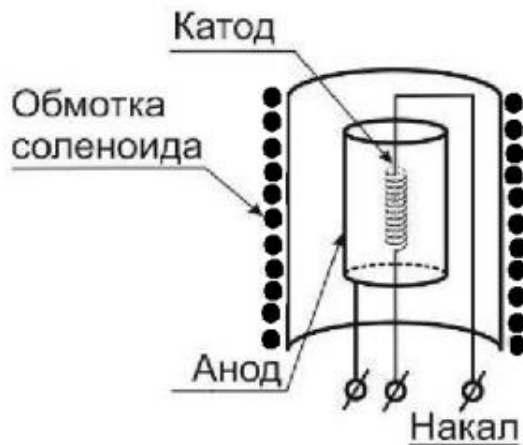


Рис.3 Продольное сечение магнетрона Рис.4 Поперечное сечение магнетрона

По второму закону Ньютона движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях может быть описано:

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]. \quad (1)$$

В нашем случае m — масса электрона, $q = -e$, где e — абсолютная величина заряда электрона, v — скорость электрона. В правой части уравнения (1) записана сила, состоящая из двух слагаемых: силы Кулона, действующей со стороны электрического поля и направленной вдоль силовых линий, и магнитной силы Лоренца, действующей со стороны магнитного поля на движущийся заряд и направленной перпендикулярно траектории движения электрона. Направление силы Лоренца определяется по правилу «левой руки» для положительного заряда. Траектория движения заряженной частицы в электромагнитном поле существенно зависит от величины удельного заряда — отношения заряда частицы к её массе. Вид траектории может быть получен из решения уравнения (1), но даже в случае цилиндрической симметрии это уравнение не имеет решения в аналитическом виде. Рассмотрим на качественном уровне движение электрона в цилиндрическом магнетроне. Для упрощения предположим, что электроны вылетают из катода с нулевой начальной скоростью, движение

происходит в плоскости, перпендикулярной оси электродов, т. е. в плоскости рис.2, и что радиус катода существенно меньше радиуса анода. При протекании тока в цепи накала в результате термоэлектронной эмиссии вокруг катода в лампе образуются свободные электроны. В электрическом поле, обусловленном анодным напряжением U_a , эти электроны двигаются от катода к аноду, что может быть зафиксировано по анодному току лампы. Постоянный ток в обмотке соленоида создает магнитное поле, искривляющее траекторию движения электронов. Выясним характер движения электронов в электрическом и магнитном полях. В электрическом поле на электрон действует сила Кулона $\vec{F} = -e\vec{E}$, вынуждающая его двигаться с ускорением в направлении, противоположном вектору \vec{E} . Эта сила совершает работу, которая идет на изменение кинетической энергии электрона. Скорость электронов вблизи анода может быть найдена с помощью закона сохранения энергии:

$$A_{эл} = W_{кин} \quad \text{или} \quad eU_a = \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

В магнитном поле сила Лоренца действует лишь на движущийся электрон: $\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]$, где $q = -e$, и направлена перпендикулярно скорости электрона и вектору магнитной индукции. Эта сила не совершает механической работы над электроном, а только изменяет направление вектора скорости и вынуждает электрон двигаться с центростремительным ускорением по окружности (в общем случае, по спирали). Применяя второй закон Ньютона для случая $\vec{v} \perp \vec{B}$:

$$ma_{ц.с.} = m \cdot \frac{v^2}{R} = e \cdot v \cdot B. \quad (3)$$

Легко получить выражение для радиуса окружности:

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (4)$$

В магнетроне электрон движется в скрещенных электрическом и магнитном полях. В отсутствии магнитного поля траектория движения приведена на рис.5а. При наложении «слабого» магнитного поля траектория электронов искривляется, но, тем не менее, все электроны долетают до анода (рис. 5б). Увеличивая индукцию магнитного поля, можно получить ситуацию, когда электрон, двигаясь по криволинейной траектории, едва не коснется анода и возвратится на катод (рис. 5в). Криволинейная траектория в этом случае представляет собой окружность, радиус которой для электрона вблизи анода примерно равен половине радиуса анода двухэлектродной лампы ($R = Ra/2$).

Используя формулу (4) можно переписать выражение для радиуса траектории электрона в этом случае:

$$\frac{R_a}{2} = \frac{mv}{eB}. \quad (5)$$

Анодный ток при этом прекращается.

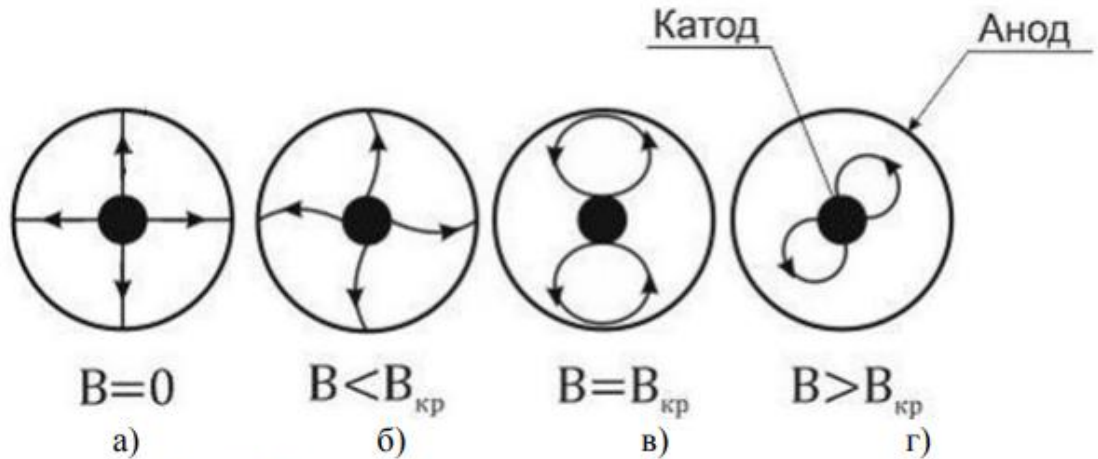


Рис.5 Траектории движения электрона в магнетроне

Таким образом, если известна индукция критического магнитного поля при определенном анодном напряжении, то из формул (2) и (5) можно рассчитать удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{R_a^2 \cdot B_{кр}^2}. \quad (6)$$

При дальнейшем увеличении магнитного поля электроны, двигаясь по криволинейным замкнутым траекториям, удаляются от катода на меньшие расстояния и никогда не долетают до анода (рис. 5г). В этом случае, когда радиус траектории электрона меньше половины радиуса анода $R \leq R_a/2$, в лампе наблюдается наиболее сильный спад анодного тока. Это значение анодного тока назовем критическим значением анодного тока. Для определения удельного заряда электрона по формуле (6) нужно, фиксируя величину анодного напряжения, найти значение индукции критического магнитного поля, при котором происходит наибольшее изменение анодного тока, названное нами $I_{кр}$. Индукция магнитного поля связана с критической силой тока в соленоиде соотношением:

$$B_{кр} = \mu_0 \cdot I_{кр} \frac{N}{l}, \quad (7)$$

где N — число витков, l — длина соленоида. Мы воспользовались выражением для индукции «длинного» соленоида - когда длина соленоида много больше его диаметра. В результате расчетная формула для удельного заряда электрона принимает вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a \cdot I^2}{R_a^2 \cdot \mu_0^2 \cdot I_{kp}^2 \cdot N^2}. \quad (8)$$

Теоретическая зависимость анодного тока от силы тока в соленоиде для идеального магнетрона приведена на рис. 6 (штриховая линия). Здесь же сплошной линией изображена реальная зависимость. Пологий спад анодного тока обусловлен следующими причинами: неоднородностью магнитного поля вблизи краев соленоида, некоаксиальностью электродов, падением напряжения вдоль катода, разбросом по скоростям эмитированных электронов и т.д. Разумно предположить, что критическое значение тока (точка перегиба графика) соответствует максимальной скорости изменения анодного тока.

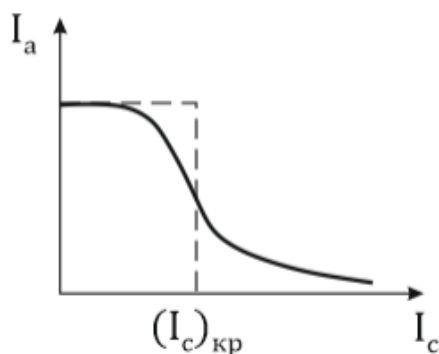


Рис.6 Зависимость анодного тока от тока соленоида

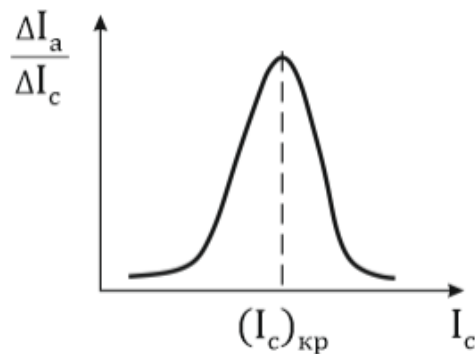


Рис.7 График производной анодного тока по току соленоида

Для нахождения этой величины нужно построить график производной от анодного тока по току в соленоиде. При графическом дифференцировании удобно разбить ось тока соленоида на равные части и в середине каждого интервала отложить по вертикали значение $\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c}$ (рис 7). Максимум построенной функции соответствует критической силе тока в соленоиде.

3. Описание лабораторной установки

Установка состоит из магнетрона, представляющего собой соленоид с помещенной внутри радиолампой, электроизмерительных приборов и источников напряжения, смонтированных внутри электрического стенда. Конструктивно анод лампы имеет форму цилиндра, вдоль оси которого расположена нить накала, являющаяся катодом. Магнетрон подключается к электрическому стенду согласно схеме (рис. 8). Соленоид подключается к источнику постоянного напряжения в левой части стенда, где с помощью амперметра фиксируется ток соленоида. Накал лампы в данной работе фиксирован, чем поддерживается постоянная температура катода. Источник напряжения и приборы, регистрирующие параметры анодной цепи, находятся в правой части стенда.

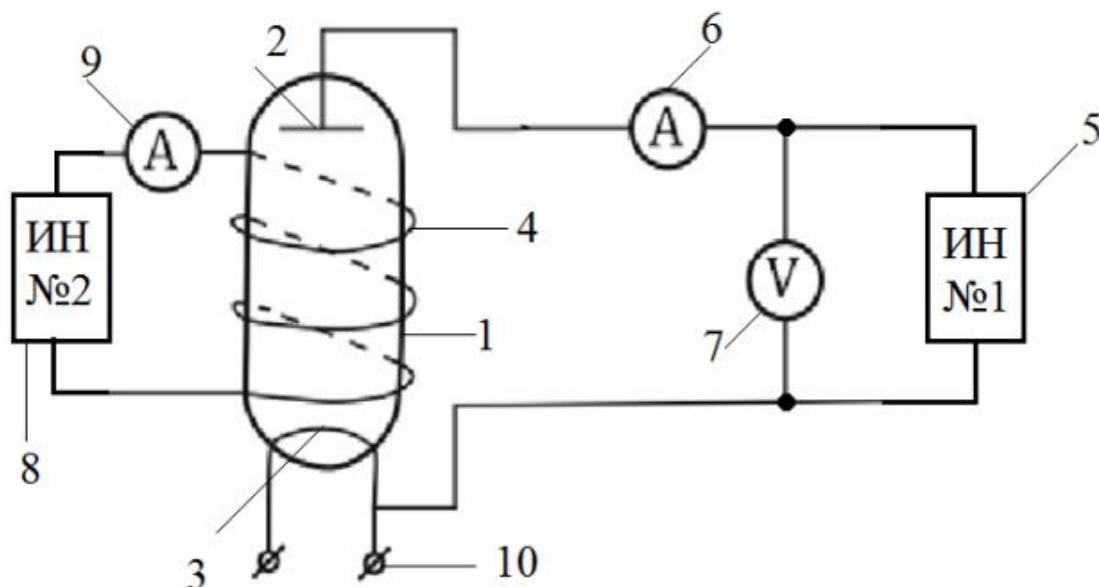


Рис. 8 Схема лабораторной установки

1. Магнетрон.
2. Анод.
3. Катод.
4. Соленоид.
5. Источник напряжения в цепи анода.
6. Миллиамперметр, измеряющий силу анодного тока.
7. Вольтметр, измеряющий анодное напряжение.
8. Источник напряжения в цепи соленоида.
9. Миллиамперметр, измеряющий силу тока соленоида.

4. Экспериментальные результаты

Число витков соленоида $N=1500$,

Магнитная постоянная $\mu_0= 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,

Радиус анода $R_a= 5 \cdot 10^{-3}$ м,

Длина соленоида $\ell = 0,1$ м.

$$\Delta I_c = 80 \text{ мА}$$

I_c , мА	I_a , мА	ΔI_a , мА	$\frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} * 10^{-4}$
0	0.72	-	-
80	0.72	0	0
160	0.72	0	0
240	0.68	$0.72-0.68=0.04$	$\frac{0.04}{80} * 10^{-4}=5 * 10^{-8}$

320	0.6	$0.68 - 0.6 = 0.08$	$\frac{0.08}{80} * 10^{-4} = 1 * 10^{-7}$
400	0.55	$0.6 - 0.55 = 0.05$	$\frac{0.05}{80} * 10^{-4} = 6.25 * 10^{-8}$
480	0.52	$0.55 - 0.52 = 0.03$	$\frac{0.03}{80} * 10^{-4} = 3.75 * 10^{-8}$
560	0,49	$0.52 - 0.49 = 0.03$	$\frac{0.03}{80} * 10^{-4} = 3.75 * 10^{-8}$
640	0,47	$0.49 - 0.47 = 0.02$	$\frac{0.02}{80} * 10^{-4} = 2.5 * 10^{-8}$
720	0,46	$0.47 - 0.46 = 0.01$	$\frac{0.01}{80} * 10^{-4} = 1.25 * 10^{-8}$
800	0,44	$0.46 - 0.44 = 0.02$	$\frac{0.02}{80} * 10^{-4} = 2.5 * 10^{-8}$

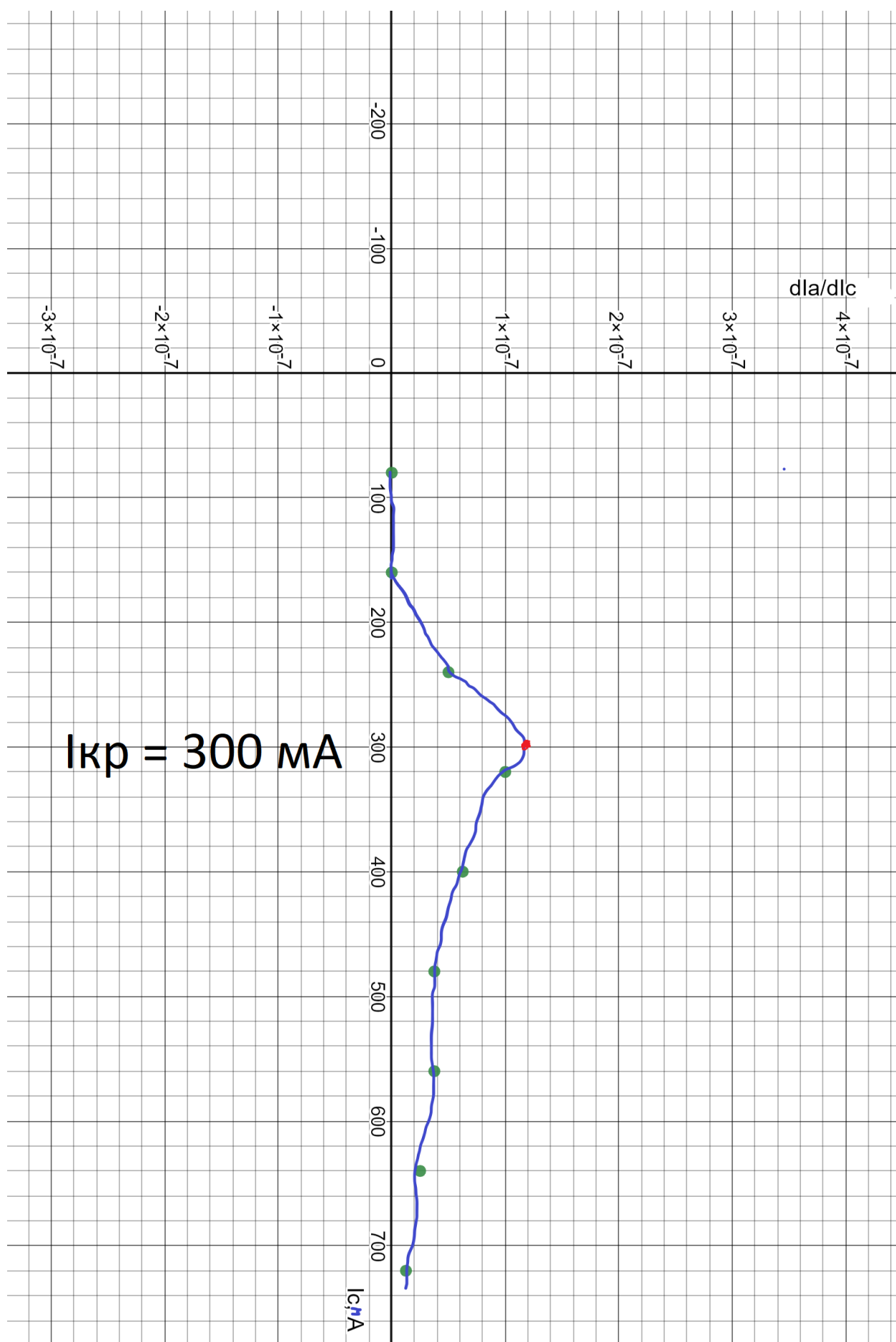
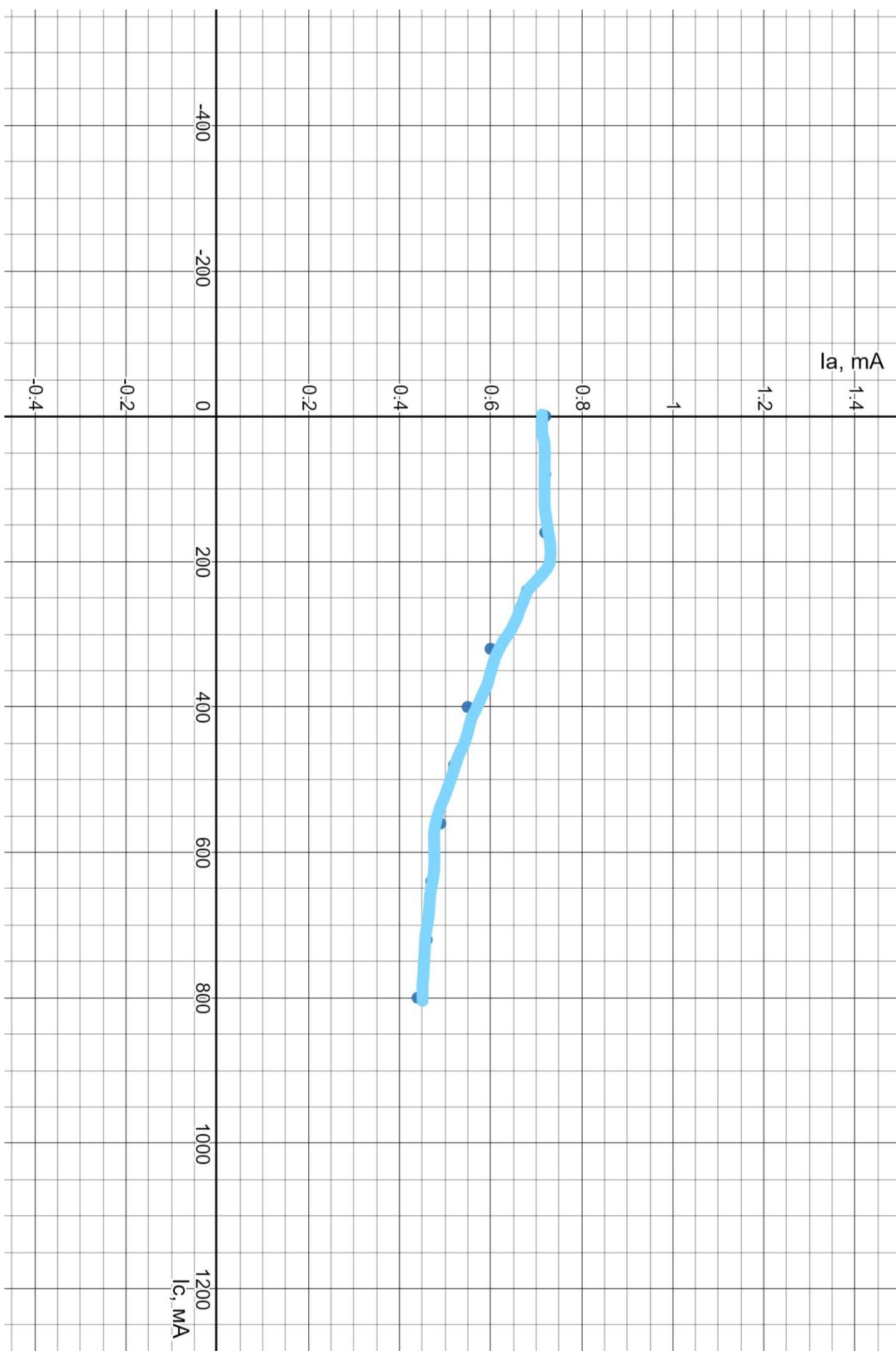


График производной анодного тока по току соленоида



Зависимость анодного тока от тока соленоида

$$\frac{e}{m}_{\text{эксп}} = \frac{8 \cdot U_a \cdot I^2}{(R_a \cdot \mu_0 \cdot I_{\text{кр}} \cdot N)^2} = \frac{8 \cdot 16 \text{ В} \cdot 0.1^2 \text{ А}^2}{(0.005 \text{ м} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot 300 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 1500)^2} = 1,60112 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

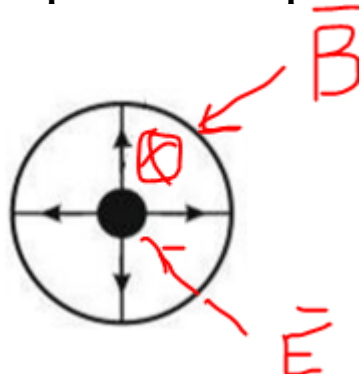
$$\frac{e}{m}_{\text{теор}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

$$\delta \frac{e}{m} = \frac{|\frac{e}{m}_{\text{теор}} - \frac{e}{m}_{\text{эксп}}|}{\frac{e}{m}_{\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{|1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}} - 1,60112 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}|}{1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}} \cdot 100\% = 9,027\%$$

Вывод: Полученное экспериментально значение величины удельного заряда электрона равно $1,60112 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$, с точностью до ошибки измерений, составляющей $9,027\%$, совпадает с теоретическим значением данной величины, равным $1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$.

5. Контрольные вопросы

- 1) **Опишите действие электрических сил на электрон в магнетроне**
В электрическом поле на электрон действует сила Кулона $\vec{F} = -e\vec{E}$, вынуждающая его двигаться с ускорением в направлении, противоположном вектору \vec{E} . Эта сила совершает работу, которая идет на изменение кинетической энергии электрона. Скорость электронов вблизи анода может быть найдена с помощью закона сохранения энергии
- 2) **Опишите действие магнитных сил на электроны в магнетроне.**
В магнитном поле сила Лоренца действует лишь на движущийся электрон: $F = q[uB]$, где $q = -e$, и направлена перпендикулярно скорости электрона и вектору магнитной индукции. Эта сила не совершает механической работы над электроном, а только изменяет направление вектора скорости и вынуждает электрон двигаться с центростремительным ускорением по окружности (в общем случае, по спирали).
- 3) **Изобразите направление электрического и магнитного полей в магнетроне в случае движения электронов по траекториям, изображенным на рис.5.**



- 4) Запишите второй закон Ньютона для электрона в магнетроне. Укажите направление действующих на электрон сил.

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}].$$

Электрон движется противоположно направлению вектора E

- 5) Выведите формулу (8) для определения удельного заряда электрона

$$ma_{ц.с.} = m \cdot \frac{v^2}{R} = e \cdot v \cdot B. \quad R = \frac{mv}{eB}. \quad \frac{R_a}{2} = \frac{mv}{eB}.$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{R_a^2 \cdot B_{кр}^2}. \quad B_{кр} = \mu_0 \cdot I_{кр} \frac{N}{l}, \quad \frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a \cdot l^2}{R_a^2 \cdot \mu_0^2 \cdot I_{кр}^2 \cdot N^2}.$$

- 6) Определите индукцию магнитного поля в средней части магнетрона.

$$B = \frac{2mv}{R_a e}$$

- 7) Приведите примеры практических устройств, использующих явление движения заряженных частиц в электромагнитном поле.

Ускорители, масс-спектрометры, рентгеноструктурный анализ

6. Задача

Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности со скоростью $v = 10^6$ м/с. Индукция магнитного поля $B = 0,3$ Тл. Радиус окружности $R = 4$ см. Найти заряд q частицы, если известно, что ее кинетическая энергия $W = 12$ кэВ.

Дано:	СИ	Решение:
$v = 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$		$F_{л} = qVB$
$B = 0,3$ Тл		$F_{л} = F_{ц}$
$R = 4$ см	0.04 м	$qvB = \frac{mv^2}{R}$
$W = 12$ кэВ	$1,92 \cdot 10^{-15}$ Дж	$m = \frac{2W}{v^2}$
q - ?		$q = \frac{mv}{BR} = \frac{2Wv}{BRv^2} = \frac{2W}{BRv}$
		$= \frac{2 \cdot 1,92 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}}{0,3 \text{ Тл} \cdot 0,04 \text{ м} \cdot 10^6 \text{ м/с}}$
		$= 9,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
		Ответ: $q = 9,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

