

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА
(МАГНЕТРОН)**

Руководство к лабораторной работе по физике
для студентов всех специальностей

2019

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф физики

_____ Е.М.Окс
15 января 2019 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА
(МАГНЕТРОН)**

Руководство к лабораторной работе по физике
для студентов всех специальностей

Разработчик:
Доцент каф. физики
_____ Ю.А. Бурачевский
15 января 2019 г.

ВЕДЕНИЕ

Удельным зарядом частицы называется физическая величина, равная отношению заряда частицы к её массе - q/m . Соответственно, удельный заряд электрона, это физическая величина, равная отношению заряда электрона к его массе - e/m .

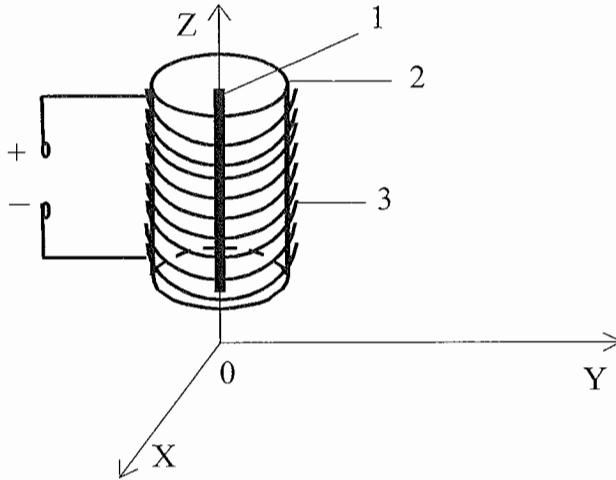
Цель работы – определить величину удельного заряда электрона, используя метод магнетрона.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При движении заряженной частицы в электрическом и магнитном полях траектория её движения зависит как от величины напряжённостей данных полей, так и от взаимной ориентации векторов скорости частицы и напряжённостей электрического и магнитного полей. В отдельности траектория движения частицы не зависит от её заряда или массы, а полностью определяется отношением q/m . Зная скорость и траекторию частицы, движущейся одновременно в электрическом и магнитном полях, структура которых задана, можно определить величину и знак удельного заряда, получить ценные сведения о природе частицы и о тех процессах, в которых она возникает. Определение удельного заряда имеет большое значение: если одна величина известна, то по найденному значению q/m можно определить и другую. Именно таким образом была определена масса электрона.

В настоящее время известны различные способы определения удельного заряда электрона: метод магнитной фокусировки, метод магнетрона, метод Чайлда-Ленгмюра, оптические методы и т.д. Одним из простейших является метод магнетрона, в котором поток заряженных частиц управляется одновременно электрическим и магнитным полями, направленными взаимно перпендикулярно.

В качестве магнетрона можно использовать электронную лампу с цилиндрическим анодом и прямолинейным катодом, расположенным на оси анода. Между анодом и катодом приложено постоянное напряжение, создающее радиальное электрическое поле. На лампу надевают соленоид, по которому протекает постоянный ток, создающий постоянное магнитное поле, направленное вдоль оси анода (рис. 1.1).



- 1 – катод;
- 2 – анод;
- 3 – соленоид.

Рисунок 1.1 – Магнетрон

Электроны, испускаемые накалившимся катодом, в отсутствие магнитного поля движутся к аноду так, что проекция их траектории на плоскость XOY представляет собой отрезки прямых (прямая 1 на рисунке 1.2).

При включении тока в соленоиде, его магнитное поле будет действовать на движущийся электрон с силой Лоренца:

$$\vec{F}_L = e[\vec{v}, \vec{B}], \quad (1.1)$$

где e – заряд электрона;

v – скорость электрона;

B – индукция магнитного поля.

Направление вектора индукции магнитного поля B определяется по правилу буравчика. Направление силы Лоренца определяется по правилу векторного произведения с учётом знака заряда. Вектор силы всегда перпендикулярен вектору скорости электрона. Это значит, что

сила Лоренца является центростремительной силой и при движении электрона в плоскости XOY будет справедливо равенство

$$e\nu B = \frac{m\nu^2}{r} \quad \text{или} \quad \frac{e}{m} = \frac{\nu}{Br}. \quad (1.2)$$

Под действием магнитного поля траектория движения электрона станет криволинейной. Из уравнения (1.2) следует, что радиус кривизны траектории зависит от скорости электрона и от величины магнитной индукции поля соленоида:

$$r = \frac{m\nu}{eB}. \quad (1.3)$$

Следовательно, при возрастании скорости электронов при приближении их к аноду возрастает и радиус кривизны траектории. В слабом магнитном поле электроны будут двигаться по криволинейным траекториям, достигая анода (кривая 2 на рисунке 1.2).

При увеличении тока в соленоиде возрастает индукция магнитного поля и возрастает кривизна траектории электрона. Увеличивая магнитную индукцию B , можно достигнуть такого её значения $B_{кр}$, начиная с которого электроны перестанут достигать анода (на рисунке 1.2 кривая 3 соответствует $B_{кр}$, а кривая 4 – $B > B_{кр}$). Анодный ток при этом становится близким к нулю.

Если катод принять за бесконечно тонкую нить (его радиус много меньше расстояния от катода до анода), то приближённо можно считать, что при $B = B_{кр}$ электроны движутся по окружностям радиуса

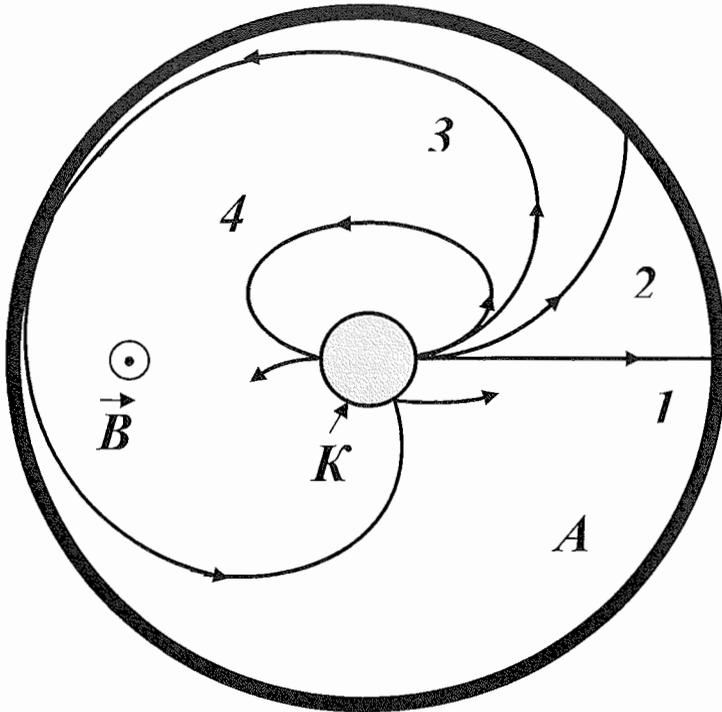
$$r = \frac{R}{2}, \quad (1.4)$$

где R – расстояние от катода до анода.

Если пренебречь распределением по скоростям вылетевших из катода электронов и приближённо принять их скорость при вылете равной нулю, то для определения значения скорости ν в формулах (1.2) можно воспользоваться соотношением:

$$eU_a = \frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2}, \quad (1.5)$$

где U_a - анодное напряжение лампы;
 $\nu_{\text{макс}}$ - максимальная скорость электрона.



A – анод;

K – катод.

1. $B_1 = 0$; 2. $B_2 > 0$; 3. $B_3 = B_{кр}$; 4. $B > B_{кр}$.
 $B_2 < B_3 < B_4$.

Рисунок 1.2 – Проекция траекторий электрона на плоскость XOY при различных значениях индукции магнитного поля

Уравнение (1.5), выражающее равенство кинетической энергии электронов вблизи анода и работы электрического поля, даёт лишь приближённое значение для скорости v . Чем ближе конструкция катода к бесконечно тонкой нити, тем с большей точностью выполняется равенство $v = v_{макс}$.

Учитывая уравнения (1.2), (1.4) и (1.5), получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 R^2}. \quad (1.6)$$

Магнитное поле в достаточно длинном соленоиде можно приближённо считать однородным и магнитную индукцию определить по формулам:

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0 n \mathbf{I} \quad \text{или} \quad B_{кр} = \mu\mu_0 n I_{кр}, \quad (1.7)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды (для вакуума $\mu = 1$);

μ_0 – магнитная постоянная (в СИ $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида;

$I_{кр}$ – значение силы тока в соленоиде, при котором индукция магнитного поля достигает критического значения.

Подставляя значение $B_{кр}$ в уравнение (1.6), окончательно получаем, что

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{\mu^2 \mu_0^2 n^2 I_{кр}^2 R^2}. \quad (1.8)$$

Таким образом, для вычисления e/m необходимо знать расстояние R от катода до анода, число витков на единицу длины соленоида n и силу тока $I_{кр}$ в соленоиде, при которой исчезает ток в анодной цепи. Значения n и R даны в описании экспериментальной установки. Опыт сводится к снятию зависимости анодного тока I_a от тока в соленоиде I_c . Резкий спад этой кривой соответствует критическим условиям работы магнетрона (рис. 1.3а).

На самом деле вертикального спада анодного тока наблюдаться не будет. На экспериментальной зависимости $I_a = f(I_c)$ (рис. 1.3б) можно выделить три прямолинейных участка. На первом участке все электроны, эмитированные катодом, достигают анода. На втором участке наблюдается плавное уменьшение анодного тока с ростом тока соленоида. Это связано с тем, что в экспериментальной установке катод установлен не точно по оси анода. Кроме этого, радиус катода отличен от нуля, т.е. катод не представляет собой бесконечно тонкую нить. Он является цилиндром малого диаметра. Так же начальные скорости электронов, вылетевших с поверхности катода, не равны нулю, а имеют различные значения (согласно распределению Максвелла). Третий участок обусловлен высокоэнергетичными электронами (их скорости много больше средней скорости). Доля их невелика (согласно

распределению Максвелла). При данном значении индукции магнитного поля B радиус кривизны траектории электрона изменяется так, что более медленные электроны уже не попадают на анод, а быстрые электроны еще достигают анода. Поэтому с ростом тока соленоида анодный ток медленно спадает (рис. 1.3б).

В данной работе для определения значения $I_{кр}$ на полученном графике $I_a = f(I_c)$ проводят две прямые: одну (горизонтальную, область 1) через точки до спада анодного тока, другую – через точки, образующие линейный участок в области 2 спада анодного тока. Точка пересечения этих прямых (касательных к областям 1 и 2) будет наиболее точно соответствовать значению $I_{кр}$ (рис. 1.3б).

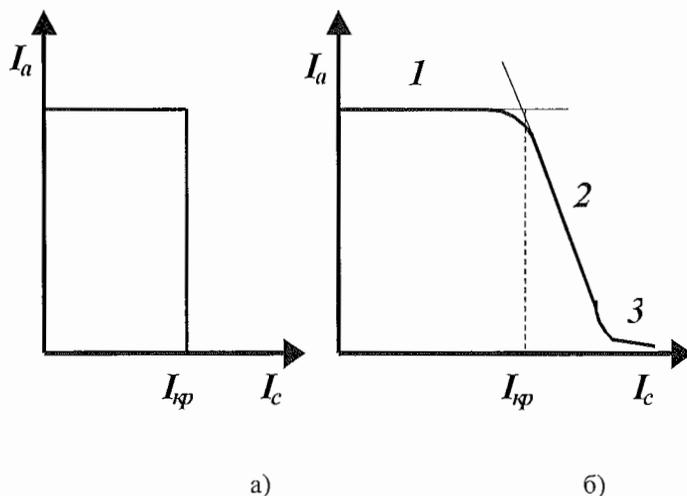


Рисунок 1.3 – Зависимость анодного тока I_a от тока в обмотке соленоида I_c

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Данная лабораторная работа по определению удельного заряда электрона методом магнетрона выполняется на унифицированных лабораторных **макетах** (вид лицевой панели **макета** приведен на рис. 4.1).

В качестве магнетрона используется электронная лампа 3Ц22С, которая имеет цилиндрические анод и катод. Диаметр катода равен 1 мм.

Несоосность между осями катода и анода порядка 1 мм. Поэтому для данной лампы расстояние от катода до анода можно принять $R = (8 \pm 1)$ мм.

На лампу надевается соленоид с большим числом витков на единицу длины. Густота намотки соленоида для всех экспериментальных макетов, совмещенных с персональными компьютерами, составляет 218 ± 5 вит./см.

Для определения зависимости анодного тока от тока соленоида используется следующая схема измерения (рис. 2.1).

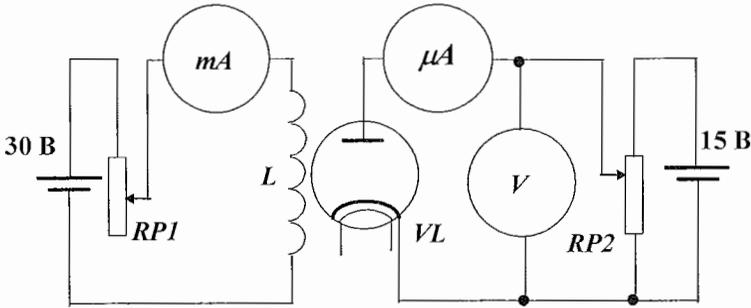


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

В качестве измерительных приборов (миллиамперметра, микроамперметра и вольтметра) используются контроллер, измерительные шкалы которого выводятся на экран монитора, создавая **стенд** (вид **стенда** приведен на рис. 4.2).

Значение анодного тока измеряется микроамперметром (μA). Значение тока соленоида измеряется миллиамперметром (mA). Вольтметр (V) измеряет анодное напряжение. Регулировка тока соленоида осуществляется с помощью ручки потенциометра $RP1$. Ручка потенциометра $RP2$ предназначена для регулирования анодного напряжения. Ручки потенциометров выведены на панель лабораторного макета.

3 ЗАДАНИЕ

3.1 Изучить работу магнетрона. Снять зависимость анодного тока в лампе от тока соленоида.

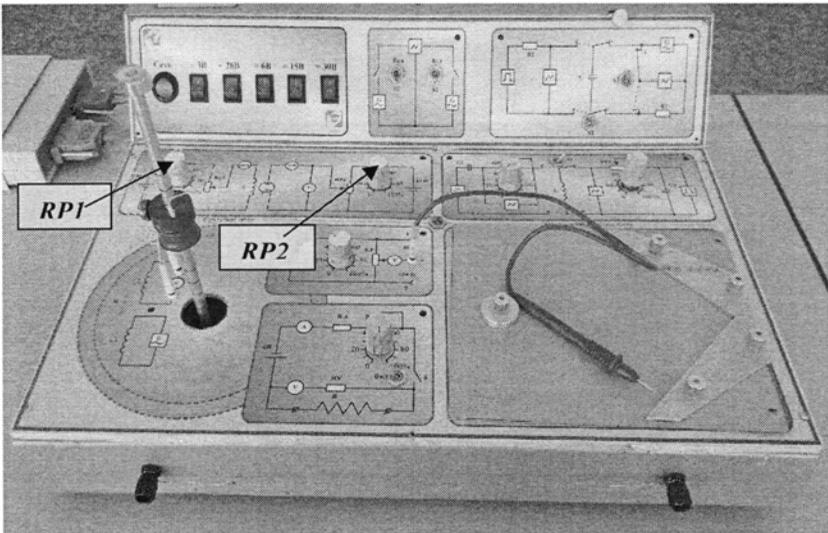
3.2 Рассчитать удельный заряд электрона по формуле (1.8) и сравнить с табличным значением.

3.3 Оценить погрешность определения удельного заряда электрона.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Запустить лабораторную работу.

4.1.1 Отключить все напряжения на лабораторном макете, расположенном справа от монитора: « ~ 3 В», « ~ 28 В», « ≈ 6 В», « ≈ 15 В», « ≈ 30 В» (рис. 4.1).



Ручка регулировки тока соленоида – *RP1*;
ручка регулировки анодного напряжения – *RP2*.
Рисунок 4.1 – Внешний вид лабораторного макета

4.1.2 Включить питание макета, нажав кнопку «Сеть».

4.1.3 Включить питание компьютера и дождаться загрузки «Windows».

4.1.4 На рабочем столе (на экране монитора, после загрузки) щелкнуть дважды левой кнопкой мышки на ярлыке папки

«Лаборатория». В открывшемся окне выбрать из списка лабораторных работ «Определение удельного заряда электрона» и по ней дважды щелкнуть левой кнопкой мышки. Во вновь открывшемся окне появится **стенд (панель)** данной работы (рис. 4.2), на котором расположены шкалы измерительных приборов и электронная таблица.



Рисунок 4.2 – Внешний вид стенда на экране монитора

4.1.5 Установить на макете ручки регулировки потенциометров в схеме в нулевое положение (повернуть до упора против часовой стрелки). Подать на схему напряжения «~3 В», «=15 В» и «=30 В» с помощью соответствующих кнопок, расположенных рядом с кнопкой «Сеть».

4.1.6 Через 1 – 2 минуты с помощью потенциометра **RP2** на макете (рис. 4.1) установить по вольтметру на стенде анодное напряжение в пределах от 6 В до 15 В.

4.1.7 Проверить работоспособность схемы. Для этого при постоянном анодном напряжении с помощью потенциометра **RPI** (рис. 4.1), увеличивая ток в соленоиде (начиная с минимального значения), проследить за изменением анодного тока. Установить на макете ручку регулировки потенциометра **RPI** в нулевое положение (повернуть до упора против часовой стрелки) и приступить к измерениям.

4.2 Проведение измерений.

4.2.1 Снять зависимость анодного тока от тока соленоида при четырёх значениях анодного напряжения в пределах от 6 В до 15 В. Причём, на линейном участке спада анодного тока (на втором участке экспериментальной зависимости см. рис. 1.3,б) получить не менее 8 – 10 экспериментальных точек. Результат каждого измерения с помощью кнопки

Добавить результат

 занести в электронную

таблицу на стенде. Эту кнопку необходимо нажимать с помощью левой кнопки мышки после каждого изменения тока соленоида.

4.2.2 После завершения измерений при одном анодном напряжении потенциометр **RPI** установить в нулевое положение. Установить новое значение анодного напряжения и повторить п.п. 4.2.1. Далее повторить п.п. 4.2.1 еще для двух других значений анодного напряжения.

4.2.3 После завершения всех измерений данные из электронной таблицы переписать в таблицу 4.1 в рабочей тетради.

4.2.4 После записи данных в рабочую тетрадь закрыть все окна на экране, поставив указатель мышки на значок «Закрыть окно»  в верхнем правом углу экрана и щелкнуть левой кнопкой мышки.

4.3 Обработка результатов измерений.

4.3.1 По полученным значениям на одном графике необходимо построить четыре зависимости $I_a = f(I_c)$ для выбранных значений анодных напряжений и графически определить значения критического тока ($I_{кр}$).

4.3.2 Зная значения критического тока $I_{кр}$, для выбранных анодных напряжений, рассчитать значения e/m . Найти среднее значение полученных результатов и систематическую, случайную и общую погрешности определения удельного заряда электрона.

4.3.3 Для вычисления случайной погрешности на экране монитора установить указатель мышки на папку «Случайная

погрешность»  и щелкнуть левой кнопкой два раза. Рассчитать случайную погрешность.

4.3.4 Конечный результат записать в виде

$$\frac{e}{m} = \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \pm \sigma_{\text{общ}} \left\{ \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \right\}.$$

$$\varepsilon \left\{ \frac{e}{m} \right\} = \frac{\sigma_{\text{общ}} \left\{ \left\langle \frac{e}{m} \right\rangle \right\}}{\left\langle \frac{e}{m} \right\rangle} \times 100\%.$$

Таблица 4.1 – Зависимость анодного тока I_a от тока соленоида I_c при различных значениях анодного напряжения U_a

Номер опыта	$U_a =$ В		$U_a =$ В		$U_a =$ В		$U_a =$ В	
	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА	$I_c,$ мА	$I_a,$ μА
1								
2								
3								
4								
·								
·								
11								
12								
13								
14								
15								
	$I_{кр} =$ мА		$I_{кр} =$ мА		$I_{кр} =$ мА		$I_{кр} =$ мА	

4.3.5 Проанализировать полученные результаты и сделать вывод.

4.4 Выключение лабораторной работы

4.4.1 Закрыть все окна на экране монитора. Выключить компьютер. Для этого щелкнуть левой кнопкой мышки по расположенной в левом нижнем углу экрана кнопке «Пуск». В открывшемся меню щелкнуть левой кнопкой мышки по строке «Завершение работы», а затем по кнопке «ОК».

4.4.2 Выключить макет. Для этого последовательно выключить кнопки «~3 В», «=15 В» и «=30 В» и «Сеть».

ВНИМАНИЕ! Включение и выключение питания макета при включённом компьютере может привести к зависанию компьютера.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

5.1 Как устроена магнетронная система?

5.2 От чего зависит радиус кривизны траектории электрона в магнетроне?

5.3 Какая сила называется силой Лоренца и как определяется её направление?

5.4 Почему сила Лоренца не изменяет кинетической энергии заряженной частицы?

5.5 По какому правилу и как определяется направление вектора магнитной индукции в соленоиде при заданном направлении тока в нём?

5.6 Что означают величины, входящие в формулу для определения магнитной индукции?

5.7 Что происходит с электронами, вылетевшими из катода, если величина магнитной индукции $B \geq B_{кр}$?

5.8 Какие из характеристик, измеренных и рассчитанных в данной работе, зависят от величины напряжения?

5.9 В какой цепи токи больше: в анодной цепи или в цепи соленоида?

5.10 Каким способом в данной работе определяется величина критического тока $I_{кр}$?

5.11 Ток эмиссии катода постоянен при постоянном токе накала. Почему при увеличении тока в соленоиде ($I > I_{кр}$) наблюдается снижение анодного тока?

5.12 Почему в экспериментальной зависимости $I_a = f(I_c)$ не наблюдается резкого спада анодного тока при величине магнитной индукции $B \geq B_{кр}$?

5.13 Два электрона с кинетическими энергиями E_1 и E_2 движутся в магнитном поле, перпендикулярно направлению поля. Найти отношение их периодов обращения и радиусов траекторий.

5.14 Определить частоту вращения (циклотронную частоту) частицы массы m и зарядом q в магнитном поле индукции B .

5.15 Выполняется ли принцип независимости движения для заряженных частиц, движущихся одновременно в электрическом и магнитном полях?

5.16 Электрон, обладающий скоростью v , попадает в однородное магнитное поле, индукция которого перпендикулярна скорости v . Окружность, какого радиуса описывает электрон?

5.17 Заряженная частица, пролетая некоторую область пространства, не отклоняется от первоначального направления движения. Можно

ли на основании этого факта утверждать, что магнитное поле в этой области отсутствует?

5.18 Пучок протонов, попадая в некоторую область пространства, отклоняется на некоторый угол. Можно ли на основании этого факта определить, каким полем вызвано отклонение, электрическим или магнитным?

5.19 Протон и электрон, имеющие одинаковую скорость, попадают в однородное магнитное поле, индукция B которого перпендикулярна скорости частиц. Как будут различаться их траектории?

5.20 Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона будет больше радиуса кривизны траектории электрона?

5.21 Протон и электрон влетают в однородное магнитное поле с одинаковой скоростью. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона будет больше радиуса кривизны траектории электрона?

5.22 Показать, что какой бы скоростью v ни обладал электрон, влетающий в однородное магнитное поле с индукцией B , и каким бы ни был угол между векторами v и B , время T , за которое он опишет виток винтовой линии, будет одним и тем же.

5.23 Показать, что радиус кривизны траектории заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле, перпендикулярном её скорости, пропорционален импульсу частицы.

6 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6.1 Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М., Наука, 2004.

6.2 Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М., Высшая школа, 1983.

6.3 Мухачёв В.А. Оценка погрешности измерений: Руководство к лабораторным работам по курсу общей физики. – Томск, ТУСУР, 2006.

6.4 Чужков Ю.П. Общие требования и правила оформления отчёта о лабораторной работе по физике. Методические указания. – Томск: ТУСУР, 2011 – 19 с.