

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

---

Кафедра физики

С.М. Новиков, А.М. Глухарев

## ФИЗИКА

**Учебно-методическое пособие**  
по выполнению лабораторной работы ЭМ–ЗК  
«Определение удельного заряда электрона»

*для студентов I курса  
всех направлений и специальностей  
всех форм обучения*

Москва  
ИД Академии Жуковского  
2021

УДК 539.18  
ББК 53  
Н72

Рецензент:

*Камзолов С.К.* – д-р техн. наук, профессор

**Новиков С.М.**

Н72      Физика [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы ЭМ–ЗК «Определение удельного заряда электрона» / С.М. Новиков, А.М. Глухарев. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. – 12 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по учебному плану для студентов I курса всех направлений и специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 17.12.2020 г. и методического совета 22.12.2020 г.

**УДК 539.18**  
**ББК 53**

*В авторской редакции*

Подписано в печать 18.05.2021 г.  
Формат 60x84/16 Печ. л. 0,75 Усл. печ. л. 0,7  
Заказ № 755/0330-УМП23 Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А  
Тел.: (495) 973-45-68  
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический  
университет гражданской авиации, 2021

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭМ-ЗК «ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА»

## 1. Цель работы

Изучение особенностей движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. Экспериментальное определение удельного заряда электрона (отношения заряда электрона к его массе). Знакомство с методом магнетрона.

## 2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по лекциям или учебникам [1, 2]: напряженность и потенциал электрического поля, разность потенциалов, магнитная индукция, сила Лоренца, характер движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Прочитайте разделы 3 и 4 методического описания. Ознакомьтесь с устройством виртуального лабораторного стенда, методом магнетрона, порядком проведения измерений и обработки их результатов по методическому описанию. Подготовьте проект отчета по лабораторной работе, а также ответы на вопросы из раздела 7 данного описания.

## 3. Краткая теория

Знание характера движения заряженных частиц в электромагнитных полях необходимо для проектирования многих технических устройств. Например, при разработке магнетронов<sup>1</sup>, датчиков Холла<sup>2</sup> и т.д. Траектория движения заряженных частиц в таких устройствах зависит от отношения заряда частицы к ее массе  $\frac{q}{m}$ , которое называется **удельным зарядом** частицы. В данной работе изучается движение в электромагнитных полях электрона, для которого это отношение записывается в виде  $\frac{e}{m_e}$ , где  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – его масса. Тщательное измерение удельного заряда и известное из опытов значение величины заряда электрона позволяют определять его массу в различных условиях. Например, при релятивистских скоростях или при движении в кристаллической решетке.

---

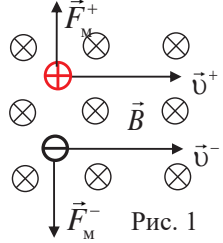
<sup>1</sup> Магнетрон – это мощная электронная лампа, в которой движущиеся под воздействием электрического и магнитного полей электроны генерируют электромагнитные микроволны.

<sup>2</sup> Датчик Холла – это устройство, которое генерирует электрические сигналы, пропорциональные приложенному к нему магнитному полю (используется в автомобилях, флагманских смартфонах и т.д.).

В общем случае на движущийся в электромагнитном поле заряд действует сила Лоренца  $\vec{F}_L$ . Для электрона она записывается в виде

$$\vec{F}_L = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где первое слагаемое  $\vec{F}_e = e\vec{E}$  является силой, действующей на электрон со стороны электрического поля с напряженностью  $\vec{E}$ , а второе  $\vec{F}_M = e\vec{v} \times \vec{B}$  — это сила, действующая на электрон, движущийся со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . Направление действия на электрон электрической составляющей  $\vec{F}_e$  противоположно направлению вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , а направление действия на электрон магнитной составляющей  $\vec{F}_M$  определяется векторным произведением  $e\vec{v} \times \vec{B}$  с учетом знака заряда электрона. На рис. 1 показаны направления действия магнитной составляющей силы Лоренца на положительный заряд  $\vec{F}_M^+$  (правило левой руки) и на отрицательный заряд  $\vec{F}_M^-$  при условии, что  $\vec{v} \perp \vec{B}$ .



Существенным различием сил  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_M$  является то, что  $\vec{F}_e = e\vec{E}$  может совершать работу над электроном и тем самым изменять его кинетическую энергию. Например, первоначально покоящийся электрон под воздействием ускоряющего напряжения  $U$  приобретает кинетическую энергию, определяемую по закону сохранения энергии

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU. \quad (2)$$

Магнитная составляющая силы Лоренца  $\vec{F}_M = e\vec{v} \times \vec{B}$  всегда перпендикулярна вектору скорости и поэтому ее мощность и работа равны нулю. Результатом ее действия является только нормальное к траектории ускорение. Например, электрон, движущийся со скоростью  $\vec{v}$ , перпендикулярной однородному магнитному полю с индукцией  $\vec{B}$ , описывает окружность, радиус которой  $r$  можно определить с помощью второго закона Ньютона:

$$F_M = m_e a_{\text{ц}}, \quad e v B = m_e \frac{v^2}{r},$$

$$r = \frac{m_e v}{eB}. \quad (3)$$

Из последней формулы следует, что радиус окружности зависит от удельного заряда электрона.

#### 4. Методика проведения эксперимента и описание установки

Используемый данной лабораторной работе простейший магнетрон представляет собой двухэлектродную вакуумную лампу (диод) с коаксиальными цилиндрическими катодом и анодом, помещенную в магнитное поле коаксиального с электродами соленоида (рис. 2). Радиус катода в используемой лампе существенно меньше радиуса анода. Стекло́нный баллон лампы и питание накала катода на рисунке не показаны. Значения анодного напряжения  $U_a$  и возникшего анодного тока  $I_a$  регистрируются вольтметром и миллиамперметром.

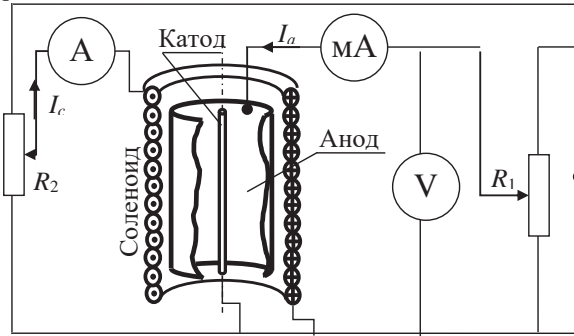


Рис. 2

После включения накала катода с его раскаленной поверхности начинают испускаться электроны вследствие явления термоэлектронной эмиссии. Энергия теплового движения электронов много меньше энергии, до которой электроны разгоняются элект-

рическим полем между катодом и анодом в данной работе. Поэтому, можно считать, что электроны покидают катод с нулевой скоростью. В отсутствии напряжения между катодом и анодом термоэмиссия электронов приводит к тому, что катод становится заряженным положительно, а вылетевшие электроны образуют пространственный (объемный) заряд вблизи его поверхности. Образовавшийся двойной электрический слой мешает дальнейшей эмиссии электронов (запирает лампу). Поэтому, показания миллиамперметра равны нулю. Если с помощью ручки потенциометра  $R_1$  установить на лампе рабочее напряжение,

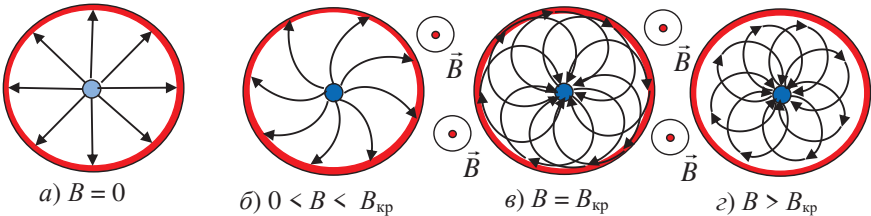


Рис. 3

то между катодом и анодом возникнет электрическое поле. Вектор напряженности  $\vec{E}$  при этом направлен радиально от анода к катоду. При выключенном магнитном поле соленоида электроны начнут перемещаться от катода к аноду

противоположно линиям электрического поля. На рис. 3а стрелками показаны направления движения и траектории электронов от катода к аноду.

Если с помощью ручки потенциометра  $R_2$  установить небольшое значение силы тока через соленоид  $I_c$ , то в нем возникнет практически однородное магнитное поле, направленное вдоль оси соленоида перпендикулярно электрическому полю. Под действием магнитной части силы Лоренца траектории электронов будут искривляться (рис. 3б). Однако сила анодного тока не изменится, так как все электроны достигнут поверхности анода. На рис. 4 приведена зависимость анодного тока  $I_a$  от величины индукции магнитного поля  $B$  соленоида при постоянном напряжении анода и постоянном токе накала катода лампы. Она называется **сбросовой характеристикой** магнетрона. Ситуации, приведенные на рис. 3 отмечены на ней точками  $a$ ,  $b$ ,  $v$  и  $z$ .

При увеличении индукции магнитного поля соленоида радиусы кривизны траекторий электронов уменьшаются. При некотором критическом значении магнитной индукции  $B_{кр}$  электроны,

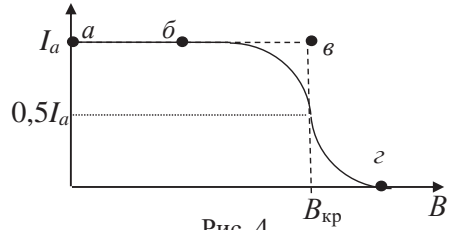


Рис. 4

не касаясь анода, начнут возвращаться к катоду (рис. 3в). С этого момента при дальнейшем увеличении магнитного поля анодный ток становится равным нулю (рис. 3г, точка  $z$  на рис. 4). Пунктирная линия на рис. 4 в виде ступеньки соответствует идеализированному случаю, когда все

электроны имеют одинаковые скорости, а конструкция лампы имеет идеальную геометрию. Но в реальном случае это не так. Электроны в межэлектродном пространстве имеют некоторое распределение по скоростям, а катод и анод могут быть не строго соосны. Получается, что электроны, имеющие скорость меньше среднего значения, не достигают анода уже при  $B < B_{кр}$ . И наоборот, электроны, имеющие скорость больше среднего значения, не достигают анода при  $B > B_{кр}$ . Поэтому зависимость анодного тока  $I_a$  от величины индукции магнитного поля  $B$  соленоида при постоянном напряжении анода и постоянном токе накала катода лампы в условиях эксперимента имеет вид сплошной линии на рис. 4. Участки этой линии вблизи точки  $B_{кр}$  практически симметричны. Поэтому, значение  $B_{кр}$  можно определить по точке, в которой анодный ток уменьшится в два раза по отношению к начальной величине при  $B = 0$ .

Можно показать, что в используемом в работе магнетроне скорость электронов вблизи анода слабо меняется, а радиус кривизны их траектории при  $B_{кр}$  равен половине радиуса анода  $r = \frac{R_a}{2}$ . Тогда с помощью формулы (3) можно записать

$$\frac{R_a}{2} = \frac{m_e v_a}{e B_{кр}} \quad \text{или} \quad B_{кр} = \frac{2m_e v_a}{e R_a}.$$

Скорость электронов вблизи анода  $u_a$  зависит от анодного напряжения  $U_a$  (см. формулу 2)  $u_a = \sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}}$ . Тогда формулу для  $B_{кр}$  можно записать в виде

$$B_{кр}^2 = \frac{8m_e U_a}{eR_a^2}. \quad (4)$$

Это линейная зависимость вида  $y = ax$ , где  $y = B_{кр}^2$ ,  $x = U_a$ ,  $a = \frac{8m_e}{eR_a^2}$ . – угловой коэффициент. Из нее следует, что измерив  $B_{кр}$  при заданном значении  $U_a$  и известном радиусе анода  $R_a$  можно рассчитать удельный заряд электрона. Для уменьшения погрешности его определения проводят серию экспериментов с последующим расчетом углового коэффициента  $a$  аналитическим методом наименьших квадратов или графическим методом<sup>3</sup>. В последнем случае строится график зависимости  $B_{кр}^2(U_a)$  в виде прямой линии, продолжение которой проходит через начало координат. По полученному значению углового коэффициента рассчитывается удельный заряд электрона по формуле

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8}{aR_a^2}. \quad (5)$$

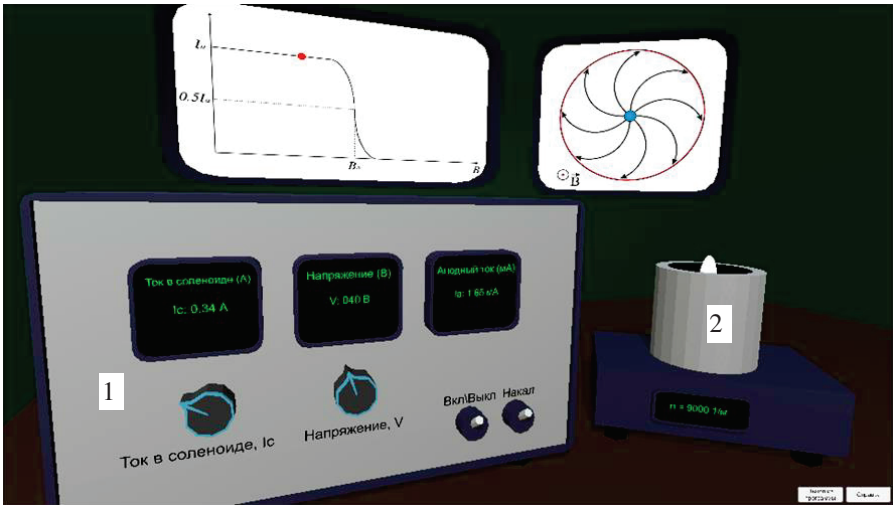


Рис. 5

В данной лабораторной работе определение зависимости  $B_{кр}^2(U_a)$  производится на интерактивном компьютерном симуляторе лабораторного стенда,

<sup>3</sup> Подробные указания приведены в лабораторной работе М-1м [3] и на стенде в лаборатории.

разработанном студентом факультета ПМиВТ МГТУ ГА А.Р. Глухаревым. На экране компьютера виртуальный лабораторный стенд имеет вид, представленный на рис. 5. Блок управления 1 содержит три цифровых прибора: амперметр измеряющий ток в соленоиде  $I_c$ , вольтметр, измеряющий анодное напряжение  $U_a$  и миллиамперметр, измеряющий анодный ток  $I_a$ . Под приборами расположены тумблеры включения блока управления и накала лампы, а также ручки регулировки тока соленоида и анодного напряжения. Справа от блока управления на подставке расположен соленоид 2, внутри которого находится диодная лампа. На заднем плане на стене расположены два монитора, на экранах которых схематически отображаются положение измеряемой точки на сбросовой характеристике и соответствующий характер траекторий электронов в лампе.

## 5. Порядок выполнения работы

5.1. Найдите на рабочем столе лабораторного компьютера ярлык папки «Виртуальные ЛР», откройте её с помощью левой кнопки компьютерной мыши. Запустите программу «Удельный заряд электрона» из этой папки. На экране монитора появится окно конфигурации, где надо нажать кнопку "play!". На появившемся изображении виртуального стенда (рис. 5) с помощью курсора включите тумблерами блок управления и накал катода. Установите нулевые показания всех приборов. Запишите в табл. 2 **значение плотности намотки соленоида  $n$** , приведенное на поверхности подставки под соленоидом.

5.2. Вращая курсором регулятор анодного напряжения, установите показание вольтметра 10 или 15 В (в зависимости от номера бригады по табл. 1). Запишите значения напряжения  $U_a$  и величины возникшего анодного тока  $I_a$ , в табл. 2.

5.3. Медленно поворачивая ручку регулировки тока соленоида по часовой стрелке, установите такой ток соленоида  $I_c$ , при котором анодный ток уменьшится примерно вдвое по сравнению с начальной величиной  $I_a$ . Запишите величину тока соленоида  $I_c$  в табл. 2.

5.4. Поворачивая ручку регулировки тока соленоида против часовой стрелки, установите нулевое значение тока соленоида.

5.5. Проведите аналогичные измерения по п.п.5.2 - 5.4 при других значениях анодного напряжения, указанных в табл. 1.

5.6. Установите нулевые показания всех приборов и выключите тумблеры накала лампы и питания блока управления.

## 6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

6.1. Для каждого значения тока соленоида  $I_c$ , записанного в табл. 2, рассчитайте соответствующее значение магнитной индукции  $B_{кр}$  по формуле  $B_{кр} = \mu_0 n I_c$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $n$  – число витков соленоида, приходящееся на единицу его длины (плотность намотки витков). Рас-



считайте значение квадрата магнитной индукции  $B_{кр}^2$ . Результаты расчетов запишите в табл. 2.

6.2. По данным табл. 2 постройте график зависимости  $B_{кр}^2(U_a)$  в виде прямой линии, продолжение которой проходит через начало координат. По размеру график должен занимать полную страницу ученической тетради (А5).

6.3. Определите графически угловой коэффициент  $a_{гр}$  построенной прямой (см. указания на стенде в лаборатории) и с его помощью рассчитайте удельный заряд электрона  $\left(\frac{e}{m_e}\right)_{гр}$  по формуле (5). Результат запишите в табл. 3.

6.4. Согласуйте полученные результаты с преподавателем и получите разрешение на их компьютерную обработку методом наименьших квадратов, используя программу Microsoft Excel. Откройте папку «Обработка результатов ЛР», расположенную на рабочем столе компьютера, и запустите файл «Расчет  $y = ax$  МНК.xls». Затем руководствуйтесь приведенными в файле пояснениями, введя обозначения  $y_i = B_{кр,i}^2$  и  $x_i = U_{ai}$ . Запишите результаты расчетов в табл. 3 в стандартной форме  $a \pm \Delta a$ , приняв в качестве погрешности определения коэффициента наклона стандартную погрешность (т.е.  $\Delta a \approx \sigma_a$ )<sup>4</sup>.

6.5. Используя полученное в предыдущем пункте значение углового коэффициента, рассчитайте удельный заряд электрона по формуле (5).

6.6. Рассчитайте относительную погрешность определения удельного заряда электрона по формуле

$$\delta\left(\frac{e}{m_e}\right) = \frac{\Delta\left(\frac{e}{m_e}\right)}{\frac{e}{m_e}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}.$$

6.7. Используя относительную погрешность, рассчитайте погрешность определения удельного заряда  $\Delta\left(\frac{e}{m_e}\right)$ . Запишите результаты расчета в стандартной форме в табл. 3 (с учетом ссылки к п. 6.4).

6.8. Сравните полученное значение удельного заряда с табличной величиной  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг и запишите выводы по результатам эксперимента.

---

<sup>4</sup> Это означает, что мы принимаем величину доверительной вероятности (надежности измерения)  $P = 0,68$  (68%), а коэффициент Стьюдента  $t_{P,n-1} \approx 1,0$ .

Таблица 1

Номер бригады	Анодное напряжение $U_a$ , В						
	1, 3, 5	10	20	30	40	50	60
2, 4, 6	15	25	35	45	55	65	75

Таблица 2

$n =$ , 1/м		$R_a = (5,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ , м			
№	$U_a$ , В	$I_a$ , А	$I_c$ , А	$B_{кр}$ , Тл	$B_{кр}^2$ , Тл <sup>2</sup>
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

Таблица 3

$a_{zp} = \dots, \frac{\text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{м}^2}$		$\left(\frac{e}{m_e}\right)_{\text{ГП}} = \dots, \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$
$a = \dots \pm \dots, \frac{\text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{м}^2}$	$\delta\left(\frac{e}{m_e}\right) = \dots, \%$	$\frac{e}{m_e} = \dots \pm \dots, \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$

## 7. Вопросы для допуска к лабораторной работе

7.1. В каком случае траектория электрона, движущегося в однородном магнитном поле, представляет собой окружность?

7.2. При каких условиях траектория электрона, движущегося в скрещенных электрическом и магнитном полях, будет прямолинейной?

7.3. Почему с увеличением силы тока в соленоиде сила анодного тока в лампе, начиная с некоторого значения, уменьшается?

7.4. Какое магнитное поле магнетрона называют критическим?

7.5. Каким образом определяется в данной работе величина критического тока в соленоиде?

7.6. Как определить скорость электрона, прошедшего ускоряющее напряжение  $U$ , если его начальная скорость была нулевой?

7.7. Может ли сила Лоренца увеличить кинетическую энергию электрона?

7.8. Проиллюстрируйте направление вектора силы Лоренца при известных направлениях векторов скорости и магнитной индукции.

7.9. Каким образом создаются электрическое и магнитное поля в магнетроне? Являются ли поля однородными? Куда они направлены?

7.10. Каким образом, измеряя анодный ток, можно определить критическое значение тока соленоида в данной работе?

## 8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: издательский центр "Академия" (или другие издательства), 2012 – 2020 г.г.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для вузов. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. – Спб.: Лань (или другие издательства), 2012 – 2020 г.г.

3. Ильясова Т.М. Пособие по выполнению лабораторной работы М-1м «Обработка результатов измерений на примере математического маятника». – М.: МГТУ ГА, 2015. – 12 с.

## Содержание

	Стр.
1. Цель работ.....	3
2. Подготовка к работе.....	3
3. Краткая теория .....	3
4. Методика проведения эксперимента и описание установки.....	5
5. Порядок выполнения работы .....	8
6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта .....	8
7. Вопросы для допуска к лабораторной работе .....	11
8. Литература .....	11