

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО  
ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ  
МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

**САМАРА 2012**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 2-15*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2012

УДК 53(075)  
ББК 22.313

Составители: *Н.М.Рогачев, В.А. Гусев*

Рецензент Н.Д. Семкин, доктор технических наук, профессор

**Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронного пучка: Метод. указания к лаб. работе 2-15/ Сост. Н.М. Рогачев, В.А. Гусев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 16 с.**

УДК 53(075)  
ББК 22.313

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

## Лабораторная работа №2-15

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Цель работы:* определение удельного заряда электрона.

*Приборы и принадлежности:* блок экспериментальной установки с электронно-лучевой трубкой и соленоидом, регулятор напряжения РНШ и киловольтметр.

#### 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Большинство методов, используемых для определения заряда элементарных частиц, основаны на зависимости траектории их движения в электрическом и магнитном полях от величины отношения заряда частицы к ее массе. Для электрона это отношение  $e/m$  называется *удельным зарядом электрона*. На электрон с зарядом  $e < 0$ , движущийся в магнитном поле с индукцией  $B$ , действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = e[\vec{v}\vec{B}]. \quad (1)$$

Раскрыв векторное произведение, из выражения (1) получим:

$$F = evB \sin\alpha, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость движения электрона,  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Сила Лоренца перпендикулярна плоскости, в которой располагаются векторы магнитной индукции  $\vec{B}$  и скорости электрона  $\vec{v}$  (рис. 1).

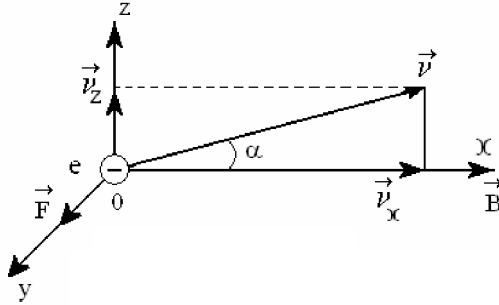


Рис. 1. Действие магнитного поля на электрон

Если в пространстве, где движется заряженная частица, магнитное поле направлено под углом  $\alpha = 0$  или  $\pi$  к ее скорости, то сила Лоренца равна нулю и частица будет скользить с постоянной скоростью по магнитной силовой линии поля, то есть магнитное поле на частицу не действует. Когда угол  $\alpha = \pi/2$ , то частица будет двигаться по окружности, так как сила Лоренца сообщает ей центростремительное ускорение. Если угол  $\alpha > 0$ , но меньше  $\pi/2$ , то движение частицы представляет собой геометрическую сумму двух движений: вращения по окружности со скоростью  $v_z = v \sin \alpha$  в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции поля, и перемещения вдоль поля со скоростью  $v_x = v \cos \alpha$  (рис.2).

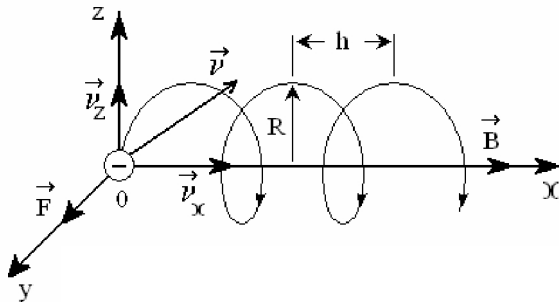


Рис. 2. Движение электрона по винтовой линии

Очевидно, что результирующая траектория частицы окажется *винтовой линией*, навивающейся на силовые линии магнитного поля.

Перепишем выражение (1) в форме:

$$F = eBv \sin\alpha = eBv_z. \quad (3)$$

Для движения по окружности (в плоскости, перпендикулярной к  $\vec{B}$ ), сила Лоренца сообщает заряженной частице центростремительное ускорение, то есть

$$Bev_z = mv_z^2 / R, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус окружности, по которой движется частица.

Время одного оборота частицы равно:

$$T = 2\pi R / v_z. \quad (5)$$

Из уравнений (4),(5) найдем:

$$T = 2\pi m / (eB). \quad (6)$$

За время одного оборота электрон, участвуя в равномерном и прямолинейном движении, переместится вдоль магнитного поля на расстояние, равное шагу винтовой линии:

$$h = v_x T. \quad (7)$$

Учитывая, что  $v_x = v \cos\alpha$ , из выражений (6) и (7) следует:

$$h = 2\pi m v \cos\alpha / (eB). \quad (8)$$

Если угол  $\alpha$  мал, то  $\cos\alpha \approx 1$ . В этих условиях можно записать:

$$h = 2\pi m v / (eB). \quad (9)$$

Таким образом, расстояние  $h$ , пройденное электроном в магнитном поле за один оборот, не зависит от угла  $\alpha$  (при малых углах). Из этого следует, что *все электроны, вышедшие из одной точки под не-*

большими, но разными углами к направлению магнитного поля, после одного оборота вновь соберутся в одной точке. В этом заключается принцип магнитной фокусировки электронов. Уравнение (9) можно использовать для определения удельного заряда электрона:

$$e/m = 2\pi v/(hB). \quad (10)$$

Для выполнения эксперимента электроны ускоряются в электрическом поле с разностью потенциалов  $U$  и приобретают кинетическую энергию, равную:

$$mv^2/2 = eU. \quad (11)$$

Из выражений (10) и (11) можно найти:

$$e/m = 8\pi^2 U/(h^2 B^2). \quad (12)$$

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для генерирования, ускорения и фокусировки электронов используется электронно-лучевая трубка с малым диаметром экрана (рис.3).

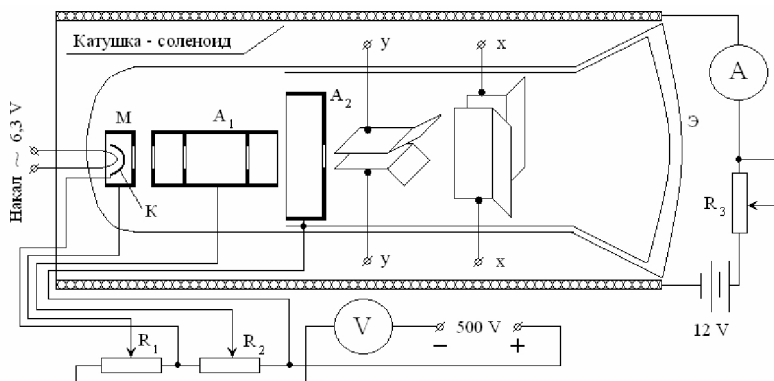


Рис. 3. Электронно-лучевая трубка в соленоиде:  
М – модулятор (управляющая сетка), К – катод,  
 $A_1$  и  $A_2$  – первый и второй аноды, Y и X – отклоняющие пластины,  
Э – экран,  $R_1$   $R_2$   $R_3$  – потенциометры, А – амперметр, V – вольтметр

Электронно-лучевая трубка представляет собой вакуумированный стеклянный цилиндр с расширением к одному концу в виде конуса. Конусообразное расширение трубки заканчивается почти плоской передней стенкой – экраном Э, покрытым изнутри слоем люминофора. Внутри трубки помещаются: нить накала, катод К, модулятор М, первый и второй аноды  $A_1$  и  $A_2$  и две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин Y и X. Если электроды соединить с источником напряжения, как показано на рис. 3, то внутри трубки можно получить узкий пучок электронов. Электроны, вылетевшие из катода под разными углами к его активной поверхности, попада-



ют в электрическое поле модулятора, имеющего отрицательный потенциал относительно катода. Этим полем поток электронов сжимается и направляется в отверстие модулятора. Так формируется электронный пучок. Интенсивность пучка, а следовательно, и яркость светящегося пятна на экране трубки можно регулировать изменением потенциала модулятора с помощью потенциометра  $R_1$ , так как поле управляющего электрода помимо сжимающего действия на поток оказывает еще и тормозящее действие на электроны. При достаточно низких значениях потенциала управляющего электрода можно добиться того, что ни один из электронов не сможет пройти электрод. После модулятора поток электронов попадает в электрическое поле первого анода (фокусирующего цилиндра), ось которого совпадает с осью трубки. Поперек его оси расположено несколько диафрагм с отверстиями в центре. На первый анод подается положительное относительно катода напряжение порядка нескольких сот вольт. Это поле ускоряет электроны в пучке и благодаря своей конфигурации сжимает электронный пучок. Так осуществляется фокусировка электронного пучка. Главная фокусировка пучка достигается изменением потенциала первого анода с помощью потенциометра  $R_2$ . Второй анод представляет собой короткий цилиндр, закрытый на конце, обращенном к экрану, диафрагмой с отверстием в центре. Его располагают непосредственно за первым анодом и подают на него более высокое (1-5 кВ), чем на первый анод, положительное напряжение.

Внутреннюю поверхность стеклянного баллона трубки почти вплоть до экрана покрывают проводящим слоем (аквадаг) и называют его третьим анодом  $A_3$ , который соединяют со вторым. При помощи электрических полей анодов электронам пучка сообщается необходимая скорость, кроме того, они фокусируются на экране трубки. Система электродов катод-модулятор-первый анод-второй анод образует так называемую *электронную пушку*.

Если к пластинам  $Y$  или  $X$  приложить разность потенциалов, то электронный луч будет отклоняться в вертикальном или горизонтальном направлении. Таким образом, претерпев на своем пути последовательно два взаимно перпендикулярных отклонения, электронный луч может быть направлен в любую точку экрана трубки. При отсутствии отклоняющих напряжений на пластинах электронный луч попадает в центр экрана трубки. Если подать на пластины конденсатора  $Y$  постоянное напряжение, то направление электронного луча изменится и светящаяся точка сместится вдоль вертикали. В случае переменного напряжения электронный луч начнет колебаться в вертикальной плоскости, а на экране появится светящаяся вертикальная линия, длина которой зависит от приложенного напряжения. По длине этой линии можно определить очень слабые напряжения и силы тока.

С помощью специальной схемы на пластины конденсатора  $X$  подается переменное напряжение  $U$  пилообразной формы (рис.4).

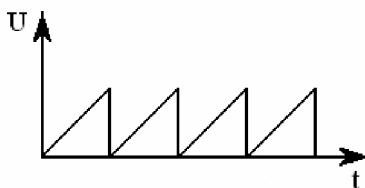


Рис. 4. Пилообразное напряжение

Под влиянием такого напряжения светящаяся точка *равномерно* переместится по горизонтали, например вправо, а затем скачком возвратится в крайнее левое положение. Этот периодически повторяющийся процесс, называемый *горизонтальной разверткой* луча, дает на экране горизонтальную светящуюся линию.

Если на вертикальное колебание луча, обусловленное исследуемым напряжением, наложить горизонтальную развертку, то луч будет описывать на экране кривую зависимости исследуемого напря-

жения от времени. Если это напряжение изменяется *периодически*, то, подобрав соответствующую частоту горизонтальной развертки, можно получить на экране *неподвижный* график исследуемого напряжения и сфотографировать его.

Электронный луч практически *безинерционен*, поэтому с помощью электронно-лучевой трубки можно исследовать очень быстро протекающие процессы (за десятиллионные доли секунды).

Экспериментальная установка монтируется на основе осциллографической схемы, при этом электронно-лучевая трубка помещается в катушку (соленоид), в которой создается постоянное магнитное поле (рис.3).

Катушка выполнена на деревянном каркасе из толстого изолированного медного провода (намотка в два слоя 8,5 витков/см). Катушка запитана током от выпрямителя ВС-26. Питание на трубку подается через электрическую схему осциллографа. Регулировка яркости и фокусировки осуществляются посредством потенциометров, ручки которых выведены на переднюю панель осциллографа. На передней панели осциллографа установлен также вольтметр для измерения ускоряющего напряжения и амперметр для измерения тока в катушке– соленоиде. Вертикальные отклоняющие пластины *У* осциллографа подсоединены к переменному напряжению, а горизонтальные пластины *Х* – заземлены.

Установка включает киловольтметр с зеркальной шкалой для измерения напряжения *U* электрического поля трубки и регулятор напряжения РНШ, предназначенный для плавного регулирования напряжения, питающего соленоид.

Значение магнитной индукции соленоида определяется по формуле:

$$B = \mu_0 I n, \quad (13)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $n$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида,  $I$  – сила тока в соленоиде. С учетом выражения (13) уравнение (12) примет вид:

$$e/m = 8\pi^2 U / (\mu_0 I n h)^2. \quad (14)$$

Для удобства работы формулу (14) запишем в виде:

$$e/m = c k^2 U / I^2, \quad (15)$$

где постоянные величины обозначены параметром  $c = 1,77 \cdot 10^8 \text{ КлА}^2/(\text{кГВ})$ ;  $k$  – число витков спирали, описываемых электронами.

Формула (15) используется для вычисления величины удельного заряда электрона при обработке экспериментальных данных. Эта формула справедлива для случая, когда электроны, двигаясь по спирали, совершают один и два витка.

### 3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ



1. Включить питание электронно-лучевой трубки «Сеть» и тумблер амперметра. При выключенном питании соленоида и вертикальных отклоняющих пластин сфокусировать ручками «Яркость», «Фокус» и «Смещение луча по вертикали» электронный луч на середину экрана трубки.

2. Подать переменное напряжение на отклоняющие пластины  $Y_1$ , включив тумблер  $U_y$ . На экране трубки появится вертикальная светящаяся линия.

3. Включить тумблер «Питание соленоида», расположенный на корпусе регулятора напряжения РНШ, и, постепенно увеличивая силу тока в катушке, вращая ручку «Регулировка тока соленоида» по часовой стрелке, установить значение магнитной индукции поля соленоида, при котором восстанавливается фокусировка электронного луча. Значения силы тока  $I$  и напряжение  $U$  при

луча. Значения силы тока  $I$  и напряжение  $U$  при фокусировке электронного луча записать в таблицу при  $k=1$ .

4. Увеличить ток в соленоиде. На экране вновь появится вертикальная линия, которая при дальнейшем увеличении тока в соленоиде соберется в светящуюся точку. При этом электроны на пути от отклоняющих пластин к экрану осциллографа проходят два витка спирали. Записать в таблицу значения силы тока  $I$  и напряжения  $U$  при  $k=2$ .

5. Выключить питание электронно-лучевой трубки и обесточить соленоид.

6. По формуле (15) произвести вычисление удельного заряда электрона. Величина  $h$ , характеризующая шаг винтовой линии, является постоянной прибора и равна расстоянию от центра отклоняющих пластин до экрана трубки. В данной экспериментальной установке  $h=0,15м$  и входит в постоянный параметр  $c$ .

7. Повторить пункты (1)-(6) еще четыре раза.

Таблица

$N\bar{2}$ $n/n$	$U_i$ $B$	$I_i$ $A$	$e/m_e$ Кл/кг	$\langle e/m \rangle$ , Кл/кг	$k$
1					1
2					2
...					
9					1
10					2

## 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По данным таблицы проведите оценку случайных погрешностей измерений удельного заряда электрона [4].

1. Определите среднее арифметическое значение удельного заряда электрона:

$$\langle e/m \rangle = \Sigma (e/m)_i / n,$$

где  $n$  – число измерений, равное 10.

2. Определите абсолютные погрешности отдельных измерений

$$\Delta (e/m)_i = \langle e/m \rangle - (e/m)_i.$$

3. Найдите сумму  $\Sigma (\Delta(e/m)_i)^2$ .

4. Вычислите среднюю квадратичную погрешность

$$S_{\langle e/m \rangle} = \sqrt{\Sigma (\Delta(e/m)_i)^2 / [n(n-1)]}.$$

5. Определите границы доверительного интервала

$$\Delta(e/m) = t_{\alpha, n} \cdot S_{\langle e/m \rangle}.$$

Для нахождения  $t_{\alpha, n}$  используйте таблицу коэффициентов Стьюдента. Доверительную вероятность  $\alpha$  примите равной 0,95.

6. Запишите результаты измерений в виде:

$$e/m = \langle e/m \rangle + \Delta(e/m); \alpha = 0,95; n = 10.$$

7. Определите относительную погрешность измерений удельного заряда электрона:

$$\varepsilon = \Delta U/U + 2 \Delta I/I,$$

где  $\Delta U$  и  $\Delta I$  – инструментальные погрешности, определяемые классом точности приборов  $\gamma$  и рассчитываются по формуле

$$\gamma = (\Delta U/U_N) \cdot 100\%,$$

где  $\Delta U_N$  – нормирующее значение (верхний предел измерений прибора). Аналогичная формула используется и для силы тока.

8. Определите относительную погрешность через класс точности приборов:

$$\varepsilon = \Delta(e/m) / (\langle e/m \rangle) \cdot 100\%.$$

9. Посчитайте погрешность полученного результата по отношению к табличному значению удельного заряда электрона, равному  $1,7588 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

10. Сделайте выводы по проделанной работе.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип действия электронно-лучевой трубки?
2. Запишите выражение для силы Лоренца.
3. Как движется заряженная частица в магнитном поле.
4. Почему при выключенном питании отклоняющих пластин электронно-лучевой трубки магнитное поле соленоида не оказывает фокусирующего действия?
5. Выведите соотношение (12), справедливое для фокусировки электронного луча.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И.В. Курс физики / И.В. Савельев. – М.: «Наука», 1989. Т.2.
2. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: «Наука», 1970.
3. Методы физических измерений (лабораторный практикум по физике) / под ред. Р.И. Солоухина. – М.: «Наука», 1975.
4. Лабораторные занятия по физике / под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: «Наука», 1983.
5. Практические рекомендации по обработке результатов измерений: Метод. указания / сост. Л.П. Муркин, Н.В. Мышкина. – Самара: Изд-во СГАУ, 1992.



*Учебное издание*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА  
ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ  
МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Методические указания  
к лабораторной работе № 2-15*

Составители: ***Николай Михайлович Рогачев  
Владимир Анатольевич Гусев***

Редактор И.И. Спиридонова  
Вёрстка – И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.011.2012. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. М33/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.