

ISSN 2307-5457

*Primum  
inter pares*

Материалы XXIX Всероссийской  
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:  
Актуальные проблемы. Современные  
решения“

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ



**УЧЕБНАЯ  
ФИЗИКА**

Октябрь - декабрь 2024 №4

Издается с января 1997 года

## СОДЕРЖАНИЕ

### Основная школа

- В. В. Майер ОПЫТЫ С ЭЛЕКТРОФОРМ КАК СПОСОБ ВВЕДЕНИЯ  
Е. И. Вараксина ПОНЯТИЯ СВОБОДНЫХ И СВЯЗАННЫХ ЗАРЯДОВ ..... 3  
Ю. А. Корнев

### Старшая школа

- Ш. Г. Зиятдинов ЗАДАЧИ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ  
НА ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ В КУРСЕ  
ШКОЛЬНОЙ ФИЗИКИ..... 12

### Высшая школа

- С. В. Барышников ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА  
ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА ..... 24

- В. В. Майер ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ:  
Е. И. Вараксина СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕМОСТРАЦИОННОГО  
И. А. Васильев АНАЛИЗАТОРА ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ... 31

### Исследования

- Е. Л. Казакова АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО  
О. В. Сергеева ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ  
ФИЗИКИ В ВУЗЕ ..... 51

- С. В. Костарев СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ  
Ю. С. Остроумова ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ В ПОДГОТОВКЕ ВОЕННЫХ  
С. Д. Ханин СПЕЦИАЛИСТОВ В НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ  
НАПРАВЛЕНИИ ..... 62

АВТОРЫ ЖУРНАЛА ..... 70

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2024 ГОДУ ..... 71

---

---

**Редакция журнала:**

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

**Редакционный совет:**

И. В. Гребенев д.п.н., профессор, Нижний Новгород  
М. Д. Даммер д.п.н., профессор, Челябинск  
П. В. Зуев д.п.н., профессор, Екатеринбург  
О. В. Лебедева д.п.н., доцент, Нижний Новгород  
Ю. А. Сауров д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров  
А. П. Усольцев д.п.н., профессор, Екатеринбург

**Оргкомитет конференции:**

Н. Я. Молотков д.п.н., профессор, Тамбов  
Г. Г. Никифоров к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва  
А. Ю. Пентин к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва  
Ф. А. Сидоренко д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург  
Я. А. Чиговская–Назарова к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов  
Т. Н. Шамало д.п.н., профессор, Екатеринбург

**Перечень ВАК:** Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

**Адрес редакции, издателя и типографии:** 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.  
*E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropach@bk.ru*

---

---

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

**Подписной индекс:** 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.12.24. Подписано в печать 16.12.24.

Дата выхода в свет: 24.12.24.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 166. Тираж 200 экз. Цена свободная.

**Первая страница обложки:** Электромагнитная индукция в разных системах отсчета [Майер В. В., Вараксина Е. И. Демонстрационные опыты перед изучением основ специальной теории относительности // Физика в школе. — 2022. — № 2. — С. 29–35.].

*Научная статья*

ББК 74.262.23

УДК 378

С. В. Барышников

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Работа посвящена определению отношения заряда электрона к его массе с использованием электронного осциллографа на лабораторных занятиях по общей физике в высших учебных заведениях. В работе рассматриваются теоретические основы метода, его преимущества и ограничения, а также описывается процедура проведения эксперимента и обработки полученных данных.

*Ключевые слова:* методика преподавания физики, электронный осциллограф, сила Лоренца, удельный заряд электрона.

S. V. Baryshnikov

## DETERMINING THE ELECTRON CHARGE-TO-MASS RATIO USING AN ELECTRON OSCILLOSCOPE

The work is devoted to determining the ratio of the electron charge to its mass using an electronic oscilloscope in laboratory classes on general physics in higher educational institutions. The work examines the theoretical foundations of the method, its advantages and limitations, and also describes the procedure for conducting the experiment and processing the obtained data.

*Ключевые слова:* physics teaching methods, electron oscilloscope, Lorentz force, specific charge of electron.

DOI: 10.62957/2307-5457-2024-4-24-30

### 1. Введение

В 1896 году британский физик Джозеф Томсон провел серию экспериментов с катодными лучами и показал, что они представляют собой не атомы или молекулы, как считалось ранее, а некоторые отрицательно заряженные частицы. Томсон произвел оценку

соотношения заряда частицы к ее массе и доказал, что это соотношение не зависит от материала катода. Это было началом открытия электрона. За эти работы в 1906 году Джозеф Томсон был удостоен Нобелевской премии по физике. В 1909 году Роберт Милликен из опытов по распределению капель масла в электрическом поле определил заряд электрона, за что в 1923 году тоже был удостоен Нобелевской премии. А из соотношения  $e/m$ , зная заряд электрона, определили его массу.

Вопрос об отношении заряда электрона к его массе входит в программы общей физики университетов и технических вузов. Во многих учебных заведениях студенты учатся находить это соотношение на лабораторных занятиях, чаще всего используя метод магнетрона. Однако для выполнения этой задачи требуются специальные лабораторные установки. Кроме того, такие установки имеют достаточно высокую стоимость. На июль 2024 г. стоимость стендов для определения удельного заряда колеблется от 105000 руб (<https://www.l-microsus.ru/catalog/359/3989/>) до 198000 руб. (<http://www.physexperiment.narod.ru>).

В данной статье мы продемонстрируем, как можно определить эту фундаментальную физическую константу, используя электронный осциллограф и электромагнит.

## 2. Сведения из теории

В электронно–лучевой трубке электронный луч создается электронной пушкой, имеющей катод для испускания электронов и ряд электродов для ускорения и фокусировки луча. Скорость движения электронов  $v$  будет определяться ускоряющим напряжением  $U$ . Из закона сохранения энергии следует, что:

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \quad \text{откуда} \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (1)$$

Если на пути электронного луча создать магнитное поле, действующее в перпендикулярном направлении (сверху вниз), то на электроны будет действовать сила Лоренца:

$$\vec{F} = -e[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (2)$$

и луч сместится в горизонтальном направлении на расстояние  $x$ . Отклонение электронного луча при действии силы Лоренца можно вывести из рис. 1.

Электрон, попавший в магнитное поле, будет испытывать действие силы Лоренца вдоль оси  $x$ , что приведет к движению его по окружности. Радиус этой окружности можно выразить из соотношения:

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad \text{откуда получаем} \quad R = \frac{mv}{eB}. \quad (3)$$

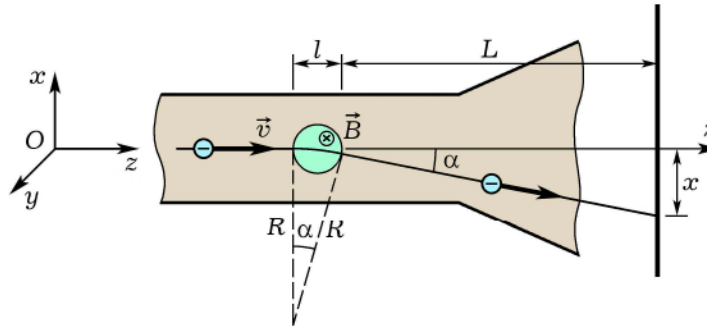


Рис. 1. Схема отклонения электронного луча в электронно-лучевой трубке при действии магнитного поля

При выходе из области действия магнитного поля электрон, отклонившись на некоторый угол  $\alpha$  по отношению к оси  $z$ , дальше будет двигаться по прямой. Отклонение луча на экране можно выразить как  $x = L \operatorname{tg} \alpha$ . Для малых углов  $\alpha \approx \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = l/R$ , тогда  $x = L \frac{l}{R}$ . Или учитывая соотношения (1) и (3), получим

$$x = \frac{eB}{mv} Ll = BLl \sqrt{\frac{e}{2mU}}, \quad (4)$$

где  $L$  — расстояние от отклоняющей системы до экрана,  $l$  — размер зоны действия магнитного поля. Более подробно движение электронов в электрических и магнитных полях и устройство электронно-лучевых приборов можно найти в [1, 2], а использование электронно-лучевой трубки в других учебных экспериментах по определению  $e/m$  в [3, 4].

### 3. Экспериментальная часть

По отклонению электронного луча в магнитном поле можно рассчитать удельный заряд электрона  $e/m$ . Для экспериментальной проверки этого метода удобно использовать плоский осциллограф С1-73, расстояние от верхней крышки до оси электронно-лучевой трубки составляет у него всего 3 см. Помещенный сверху электромагнит будет легко отклонять электронный луч, и если магнитное поле отклоняющей системы однородно, из соотношения (4) мы получим формулу:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 L^2 l^2} x^2. \quad (5)$$

Если использовать одну катушку с железным сердечником, магнитное поле будет неоднородным. Однако это можно учесть, ес-

ли предварительно определить распределение индукции магнитного поля на расстоянии 3 см от электромагнита вдоль оси  $z$ . На рис. 2 приведена зависимость вертикальной составляющей индукции магнитного поля от горизонтальной координаты  $z$  для катушки с железным сердечником, имеющей 1700 витков при протекании тока 200 мА.

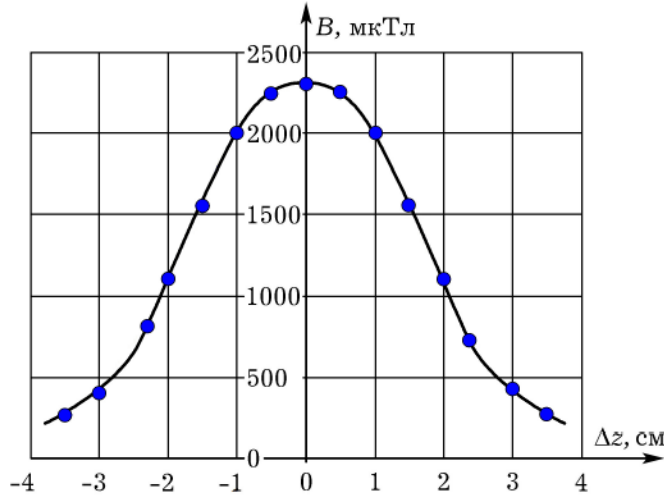


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля вдоль оси  $z$  электронно-лучевой трубки для катушки с магнитным сердечником

Имея кривую распределения  $B = B(z)$ , в соотношении (4) следует заменить:

$$Bl \Rightarrow \int_0^l B(z)dz.$$

Эту величину можно найти численным интегрированием функции  $B(z)$ , приведенной на рис. 2, например, в *Excel*. В этом случае точность определения  $e/m$  будет зависеть от точности снятия и построения кривой  $B(z)$ . Однако, для упрощения лабораторной работы в ее описании студентам можно предоставить готовую кривую  $B(z)$ .

Задачу можно упростить и увеличить точность определения  $e/m$ , если использовать большую катушку без сердечника, например, катушку дроссельную (учебную), имеющую 2400 витков и внутреннее сечение размером  $3,7 \times 4,7$  см.

В качестве одного из заданий для студентов можно дать исследование магнитного поля катушки. Сначала закрепляют линейку в штативе на расстоянии 3 см, как это показано на фотографии

(рис. 3) и, перемещая датчик магнитометра вдоль линейки, строят график распределения магнитной индукции поля катушки вдоль горизонтальной прямой. Следующий этап: на катушку кладут железную пластину толщиной 0,7 мм, имитирующую крышку осциллографа, и повторяют процедуру. В качестве примера на рис. 4 показана зависимость  $B = B(z)$  для обоих случаев при силе тока через катушку 520 мА.

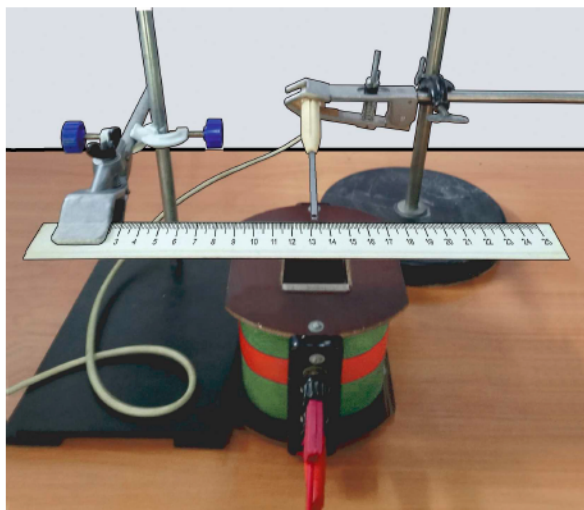


Рис. 3. Фотография установки для исследования магнитного поля катушки

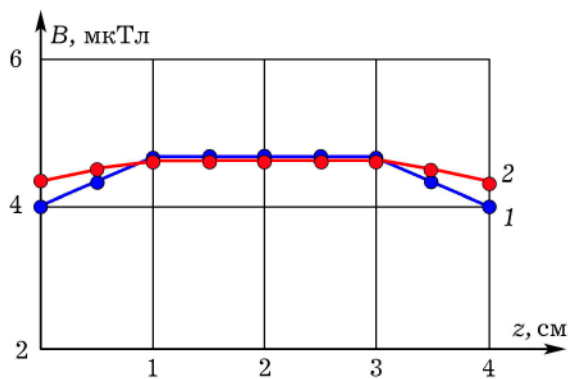


Рис. 4. Распределение индукции магнитного поля в пределах зазора: 1 — без учета экранирования корпусом осциллографа; 2 — с учетом влияния корпуса

Как следует из графика, приведенного на рис.4, железная крышка осциллографа уменьшает неоднородность магнитного поля катушки. Если в пределах зазора на расстоянии 3 см неоднородность без учета корпуса осциллографа составляет 14%, то с учетом корпуса она не превышает 7,1%.

Теперь, если катушку поставить на осциллограф так, чтобы одна сторона внутреннего отверстия катушки совпадала с плоскостью экрана, то на протяжении  $L = 3,7$  см перед экраном электроны движутся в достаточно однородном магнитном поле.

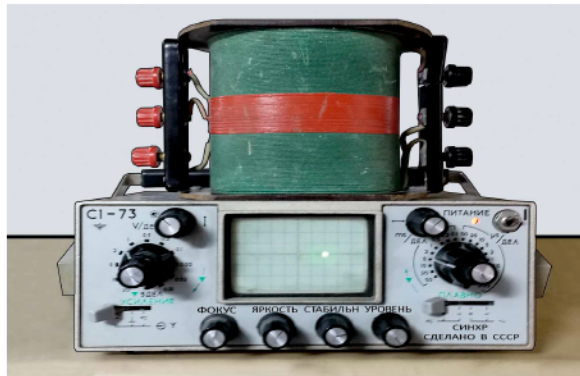


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки

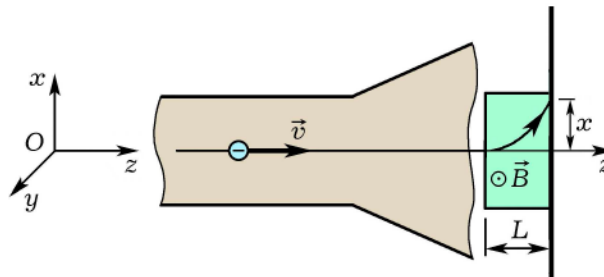


Рис. 6. Система отклонения электронного луча катушкой больших размеров без магнитного сердечника

В этом случае смещение луча на экране можно найти, используя обычные формулы механики:

$$x = \frac{at^2}{2}, \quad a = \frac{F}{m} = \frac{evB}{m}, \quad t = \frac{L}{v}$$



$$\text{или } x = \frac{F}{2m} t^2 = \frac{evB}{2m} \left(\frac{L}{v}\right)^2 = \frac{eL^2B}{2mv}. \quad (6)$$

Подставляя скорость электронов из соотношения (1), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B^2L^4} x^2, \quad (7)$$

где  $U$  — ускоряющее напряжение (для осциллографа С1–73 согласно документации оно составляет 2300 В),  $L$  — ширина внутреннего сечения катушки (в данном случае  $L = 3,7$  см),  $x$  — отклонение луча на экране по горизонтальной оси  $x$ ,  $B$  — вертикальная составляющая индукции магнитного поля катушки на расстоянии 3 см.

Теперь, измерив отклонение луча по оси  $x$  и измерив с помощью магнитометра значение индукции магнитного поля для установленного тока, можно рассчитать значение удельного заряда электрона. Так, при  $U = 2300$  В,  $L = 3,7$  см,  $x = 1$  см и  $B = 2,53$  мТл, значение удельного заряда получается  $e/m = 1,53 \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Это значение отличается от табличного всего на 13%, что для учебной лабораторной установки является хорошим результатом.

#### 4. Заключение

Таким образом, несмотря на отсутствие заводской лабораторной установки для определения удельного заряда  $e/m$  методом магнетрона, эту задачу можно решить с использованием электронного осциллографа и электромагнита. Результат, полученный таким методом, часто ближе к табличным значениям по сравнению с результатом, полученным методом магнетрона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника: Физико–технические основы: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2004. — 464 с.
2. Вуколов Н. И., Гербин А. И., Котовщиков Г. С. Приемные электронно-лучевые трубки: Справочник. — М.: Радио и связь, 1993. — 576 с.
3. Анциферов Л. И. Пять работ практикума в старших классах / В сб. Физический эксперимент в школе. Выпуск 3. Пособие для учителей / Составитель С. Я. Шамаш. — М.: Просвещение, 1966. — С. 88–105.
4. Дик Ю. И., Кабардин О. Ф., Орлов В. А. и др. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики: 10–11 кл. / Под ред. Ю. И. Дика, О. Ф. Кабардина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Просвещение, 2002. — С. 85–87.

Благовещенский государственный  
педагогический университет

Поступила в редакцию 05.08.24.