

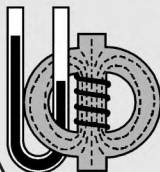
ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXVIII Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения”

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ



**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Октябрь - декабрь 2023 №4

Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

В. В. Майер	ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ШКОЛЬНИКОВ	
Е. И. Вараксина	ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА	3

Старшая школа

И. В. Гребнев	РАЗВИТИЕ УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ТЕРМОЭМИССИИ	10
В. В. Майер	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕМОНСТРАЦИИ	
Е. И. Вараксина	ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ТУМАНЕ	18

Высшая школа

А. И. Грибков	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ	
Р. В. Романов	КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ	26
В. В. Майер	СКОРОСТЬ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ И	
Е. И. Вараксина	ЕЕ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	40
С. И. Официн	ПРОЕКТНЫЙ МЕТОД В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ	58

Науковедение

Ю. А. Сауров	КОНКРЕТНОСТЬ «ЕДИНСТВА ВО МНОГООБРАЗИИ» И ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНКРЕТНОСТЬ В МЕТОДИКЕ ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ	66
--------------	--	----

АВТОРЫ ЖУРНАЛА 70

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2023 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
В. А. Саранин	д.ф.-м.н., профессор, Глазов
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 ГГПИ, 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, Пединститут. Телефон: (341 41) 5-32-29.
E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropa@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 01.11.23. Подписано в печать 20.12.23.

Дата выхода в свет: 22.12.23.

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

Заказ 160. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Экспериментальная установка для градуировки электрометра по напряжению.

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

И. В. Гребенев
РАЗВИТИЕ УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ ТЕРМОЭМИССИИ

В статье обоснована возможность упрощения постановки эксперимента по определению заряда электрона методом термоэмиссии. Предложено рассматривать вакуумный диод как источник ЭДС. Приведены результаты расширенного варианта эксперимента.

Ключевые слова: заряд электрона, термоэмиссия, вакуумный диод, учебный физический эксперимент, экспериментирующее мышление.

I. V. Grebenev
DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL EXPERIMENT
TO DETERMINE THE CHARGE OF ELECTRON
BY THERMAL EMISSION METHOD

The article substantiates the possibility of simplifying the formulation of an experiment to determine the electron charge by the thermal emission method. It is proposed to consider a vacuum diode as an EMF source. The results of an extended version of the experiment are presented.

Keywords: electron charge, thermal emission, vacuum diode, educational physical experiment, experimenting thinking.

Введение. Взаимоотношение преподавателя физики с экспериментом определяется его взглядами на роль педагога в учебном процессе в целом. Если педагогу присуще экспериментирующее мышление, то он является автором каждого конкретного варианта эксперимента в уроке как с технической, так и с методической

точки зрения [1]. В этой статье мы хотим показать, каким образом может развиваться известный эксперимент, если отойти от описанных вариантов.

Среди задач школьного физического эксперимента выделяется определение мировых констант и значений физических постоянных, что приближает по значению учебный эксперимент к реальному физическому исследованию. Одной из важнейших констант в физике является элементарный заряд, определяемый в учебном процессе как заряд электрона e , через который выражаются в атомной физике подавляющее большинство величин от боровского радиуса до постоянной тонкой структуры.

В практике обучения физике в средней школе наиболее распространен способ определения заряда электрона через электролиз. Недостатком этого способа является косвенная связь получаемых в эксперименте значений с искомой величиной, вычисления через законы Фарадея. В свое время была предложена работа по определению заряда электрона методом термоэмиссии [2], в которой схема аналогична известной работе курса общей физики по определению вида распределения электронов по скоростям [3, с. 321–323]. В обоих случаях применялся метод задерживающего потенциала по схеме рис. 1.

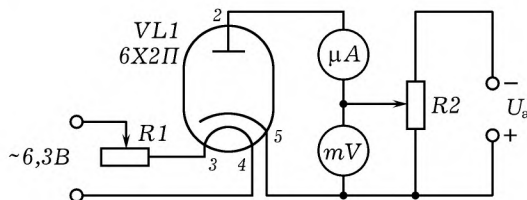


Рис. 1. Схема работы по определению заряда электрона

Кратко опишем основы физики работы. При использовании вакуумного диода типа 6X2П малость расстояния между катодом и анодом позволяет использовать одномерное плоское приближение для конфигурации электрического поля и соответствующий вариант распределения Максвелла–Больцмана [3, с. 322–323]. Электронный газ находится в тепловом равновесии с катодом и в силу распределения Больцмана число электронов, достигающих точки с потенциалом U , выразится так:

$$n(U) = n_0 e^{-eU/kT}. \quad (1)$$

Здесь n_0 — общее число эмитированных электронов в единицу времени, T — температура катода, определяемая по сопротивлению нити накала и равная в последующих опытах 1200 К, k —

постоянная Больцмана. Тогда анодный ток I явится функцией задерживающего напряжения U :

$$I(U) = I_0 e^{-eU/kT}. \quad (2)$$

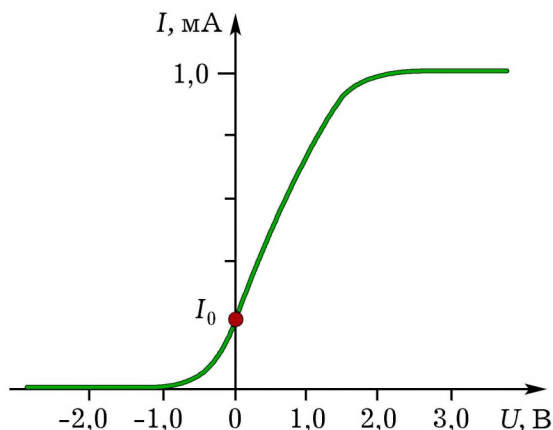


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика вакуумного диода

Здесь важно отметить, что при такой записи сила тока I_0 соответствует напряжению U (катод–анод)=0 (рис. 2) и экспериментально в этом варианте опыта не определяется. Поэтому удобно логарифмировать уравнение (2), получив следующее выражение:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{eU}{kT}, \quad \text{или} \quad \ln I = \text{const} - \frac{eU}{kT}. \quad (3)$$

Построив график зависимости (3), по угловому коэффициенту прямой $\text{tg } \varphi$, при условии подстановки значений напряжения на потенциометре U в вольтах, определим и значение заряда электрона: $e = kT \cdot \text{tg } \varphi$ (рис. 3). По приведенным данным $e = 1,2 \cdot 10^{-19}$ Кл. Константа этой линейной функции соответствует логарифму величины «нулевого тока», I_0 , который может быть таким образом экспериментально определен.

Постановка проблемы. Задумаемся, а нужен ли в схеме рис. 1 внешний источник напряжения? Существование тока I_0 (рис. 2) при отсутствии внешнего напряжения указывает нам на существование какой-то ЭДС, обеспечивающей ток через микроамперметр и рассеивание джоулева тепла как минимум на его сопротивлении.

Идея нового варианта. Внутри диода происходит разделение зарядов путем термоэмиссии, обеспечивающее разность потенциалов между катодом и анодом, ток во внешней части цепи, как при

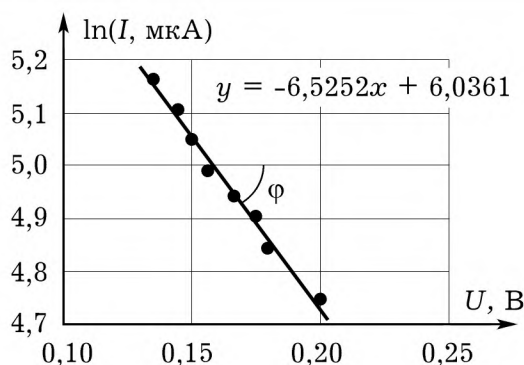


Рис. 3. Результаты опыта по определению заряда электрона

отсутствии внешнего напряжения, так и при небольшом отрицательном напряжении на аноде. В этом случае диод является источником ЭДС, имеющим нулевое внутреннее сопротивление и описываемым характеристикой (2). Поэтому никаких внешних источников в этой работе не требуется. Термоэлектронная эмиссия обеспечит отрицательный заряд анода, следовательно, существование тока во внешней части цепи и возникновение задерживающего напряжения. Поэтому работа по определению заряда электрона успешно выполняется по упрощенной схеме (рис. 4). Из известных нам работ впервые подобную схему предложил В. Бобоев [4]. Следует особо отметить, что расположение измерительных приборов в схеме рис. 1 определялось спецификой использовавшихся в то время вольтметров, имеющих недостаточно большое внутреннее сопротивление. А это приводило к необходимости для определения истинного значения напряжения на диоде вычитать из показаний вольтметра падение напряжения на амперметре [3, с. 324], что отражено положением самой левой точки графика (рис. 3), и соответственному возрастанию погрешностей результатов. Доступные сегодня цифровые приборы имеют внутреннее сопротивление не менее 1 МОм и могут определять падение напряжения на диоде без внесения погрешностей в показания микроамперметра.

Новый алгоритм. В случае замыкания диода через внешнее сопротивление напряжение U и ток I определяются величиной внешнего сопротивления R (резистор $R2$ на рис. 4). При этом ток во внешней цепи

$$I = \frac{U}{R}. \tag{4}$$

Для определения установившегося значения тока следует совместно решать уравнения (2) и (4). Представим это решение в виде точки пересечения графиков соответствующих функций (рис. 5).

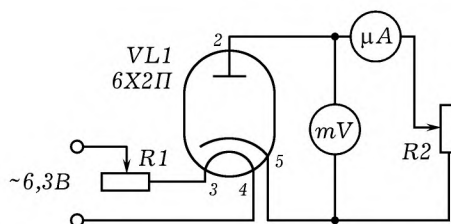


Рис. 4. Модифицированная схема для определения заряда электрона

Точка пересечения графиков на рис. 5 определяет значение тока эмиссии и напряжение анод–катод при заданной величине сопротивления внешней цепи: $R = \text{ctg } \alpha$. Изменяя это сопротивление и получая пары значений (U, I) , можно с большим основанием применять явление термоэмиссии для определения заряда электрона по формуле (4), используя более простую схему рис. 4. Типичные значения полученной величины заряда электрона укладываются в доверительный интервал погрешностей не более 5% от табличного значения.

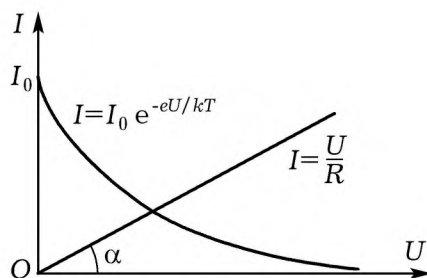


Рис. 5. Установившийся режим работы диода как источника ЭДС

Так, по данным, приведенным на рис. 6, заряд электрона $e = 1,65 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Отметим, что приведенная методика позволяет получить достаточно малые значения задерживающего напряжения и, соответственно, больших токов, т.е. оценить, казалось бы, величину I_0 . Однако делать этого не следует, поскольку при малых напряжениях начинает проявляться влияние контактной разности потенциалов «анод–катод», уменьшающей силу тока и искажающей результаты, о чем говорит «кивок» графика рис. 6 вниз в области малых напряжений. Поэтому I_0 по-прежнему определяется по константе линейной функции графика рис. 6.

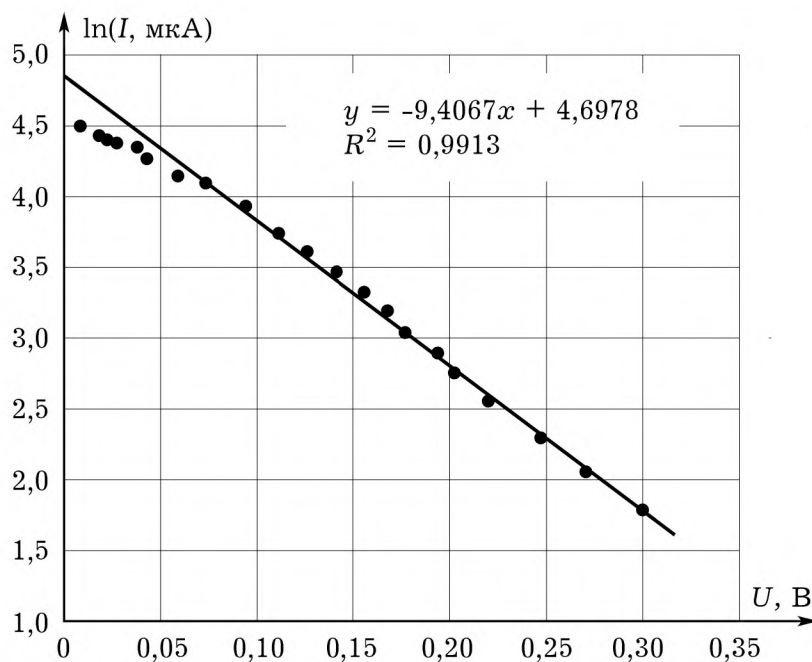


Рис. 6. Результаты модифицированного эксперимента определения заряда электрона

Расширение возможностей эксперимента. Рассмотрим еще некоторые возможности анализа результатов нашего эксперимента. Выпишем совместно уравнения (2) и (4):

$$\frac{U}{R} = I_0 e^{-eU/kT}. \quad (5)$$

Разрешим его относительно R :

$$R = \frac{U}{I_0} e^{eU/kT}. \quad (6)$$

При фиксированных параметрах установки, в первую очередь тока накала, т.е. температуры катода, величина I_0 определяется как константа линейной зависимости (3), являясь основной характеристикой диода. Таким образом, уравнение (6) описывает работу диода в качестве источника ЭДС при нагрузке R .

Элементарная теория зарядки анода термоэмиссией. Рассмотрим идеальный случай, когда термоэмиссия включается сразу с интенсивностью n_0 электронов в секунду. Если емкость системы «анод–катод» обозначить C , и считать внешнюю цепь разомкнутой,

то заряд анода $q(t)$ можно определить из следующих соображений. Задерживающее напряжение выразится так: $U = q/C$. Модифицируем формулу (1):

$$dq = en_0 e^{-eq/CkT} \cdot dt, \quad (7)$$

начальное условие $q(0) = 0$. Интегрируем:

$$q(t) = q_0 \ln(1 + bt),$$

где $q_0 = \frac{CkT}{e}$, а $b = \frac{e^2 n_0}{CkT}$. Тогда

$$U(t) = \frac{q_0 \ln(1 + bt)}{C}. \quad (8)$$

Характерное значение напряжения «катод–анод» $U_0 = q_0/C = kT/e = 0,13$ В.

Константа b может быть определена по значению тока I_0 , который, в свою очередь определялся выше как константа экспериментальной линейной зависимости (3). По приведенным на рис. 6 данным экспериментов было получено значение $I_0 = 133$ мкА.

Считая, что $I_0 = n_0 e$, зная типичное значение емкости «катод–анод» $C = 4$ пФ и температуру катода $T = 1200$ К, получим следующие значения констант для формулы (8): $b = 6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, $q_0 = 0,54$ пКл.

Понятно, что зависимость (6) в эксперименте будет нарушена конкурирующими процессами разряда анода, вследствие либо эмиссии электронов с анода¹, либо вследствие утечки заряда через сопротивление внешней цепи. Установится динамическое равновесие, при котором анод имеет так называемый «плавающий потенциал».

Экспериментальное подтверждение теории. Прямые измерения напряжения «анод–катод» при разомкнутой цепи и использовании высокоомных вольтметров показывают установившиеся значения этой величины порядка 1 вольта. Это значение в соответствие с формулой (8) для приведенных выше значений b и q_0 дает времена установления равновесных значений заряда порядка 10^{-4} с.

Для экспериментального подтверждения формулы (6) нами предложена следующая методика. В схему включался триод 6Н2П, между катодом и сеткой которого подавалось через диод однополярное напряжение типа «меандр» частотой 2 кГц и амплитудой 2 В. Частота генератора подобрана такой, чтобы за отрицательный полупериод «меандра» анод триода разрядился бы через входные цепи осциллографа, включенного в режиме измерения постоянных токов. Зависимость напряжения «анод–катод» от времени контролировалось осциллографом.

¹Анод расположен на расстоянии нескольких миллиметров от катода, имеющего температуру около 1300 К, поэтому некоторую эмиссию с него вполне можно допустить.

Когда на сетку подан нулевой потенциал, анод за счет эмиссионного тока приобретает отрицательный заряд по выражению (8), что подтверждает характерный вид нисходящей ветви зависимости $U(t)$ на фото (рис. 7). Частота развертки осциллографа подобрана такой, чтобы наглядно представить процессы зарядки и разрядки анода. По горизонтальной оси одно деление сетки равно 100 мкс, так можно определить время, за которое процесс выходит на режим, близкий к равновесному значению заряда и потенциала анода. Оно оказывается близким к приведенной выше оценке 10^{-4} с.

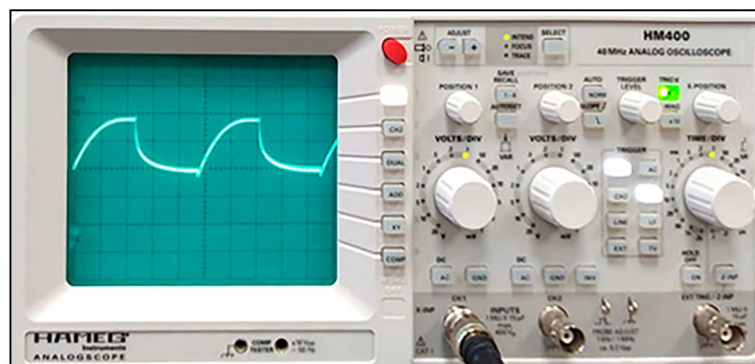


Рис. 7. Экспериментальное исследование процесса зарядки анода

Заключение. В работе Е. И. Вараксиной [5] показано, что сам учебный физический эксперимент является объектом методического исследования, которое может существенно расширить его известные рамки. Нами проведено исследование технических и методических возможностей известного учебного эксперимента по определению заряда электрона. Предложен новый вариант работы, проведено исследование функционирования вакуумного диода как источника ЭДС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенев И. В. Методическое значение экспериментирующего мышления // Учебная физика. — 2023. — № 1. — С. 45–54.
2. Пинский А. А., Юшин В. Н. Определение заряда электрона в учебном эксперименте // Физика в школе. — 1986. — № 6. — С. 70–72.
3. Физический практикум. Электричество и оптика / под ред. В. И. Ивероновой. — М.: Наука, 1968. — 818 с.
4. Бобоев В. Демонстрация термоэлектронной эмиссии // Физика в школе. — 1973. — № 6. — С. 73.
5. Вараксина Е. И. Методология научного исследования учебного физического эксперимента: Монография. — М.: Флинта, 2022. — 192 с.

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н. И. Лобачевского

Поступила в редакцию 14.09.23.