

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Отделения
экспериментальной физики ТПУ

_____ А. М. Лидер
« ____ » _____ 2023 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА
МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы 2-01 по
курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и специальностей

Составители **Л.А. Святкин**

Издательство
Томского политехнического университета
2023

УДК 537
ББК 22.338
М00

Определение удельного заряда электрона методом магнетрона: Методические указания к выполнению лабораторной работы 2-01 по курсу физики для студентов всех направлений и специальностей / сост.: Л.А. Святкин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 13 с.

УДК 537
ББК 22.338

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим семинаром Отделения экспериментальной физики
«__» _____ 2023 г.

Зав. кафедрой – руководитель отделения
экспериментальной физики на правах кафедры
доктор технических наук,
Профессор

_____ *А.М. Лидер*

Председатель
учебно-методической комиссии

_____ *А.М. Лидер*

Рецензенты
Кандидат физико-математических наук
Доцент ОЭФ ИЯТШ НИ ТПУ
В.С. Сыпченко

© Составление, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2023
© Святкин Л.А., составление, 2023

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы: изучить характер движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях, ознакомиться с методом магнетрона и определить удельный заряд электрона.

Приборы и принадлежности: источника питания с цифровыми приборами и модуль «Магнетрон».

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Важной характеристикой заряженной частицы, определяющей ее поведение в магнитных и электрических полях, является удельный заряд. Удельным зарядом частицы называется физическая величина, равная отношению заряда q частицы к её массе m . Для определения удельного заряда электрона используется метод магнетрона. Магнетрон – это электронная лампа, в которой катод и анод образуют коаксиальную систему, помещенную в продольное однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом. Вылетающие из катода термоэлектроны движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях (напряженность $\vec{E}$ направлена по радиусу от анода к катоду; индукция $\vec{B}$ – вдоль оси магнетрона) под воздействием полной силы Лоренца

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

где e – заряд электрона, $\vec{v}$ – вектор скорости электрона.

Первое слагаемое в правой части уравнения (1) $\vec{F}_э = e\vec{E}$ – сила электростатического поля, направленная в сторону, противоположную вектору $\vec{E}$ (т.к. электрон обладает отрицательным зарядом). Второе слагаемое $\vec{F}_м = e\vec{v} \times \vec{B}$ – сила Лоренца, которая изменяет направление движения электрона.

Силы, действующие на электрон в магнетроне, лежат в плоскости перпендикулярной оси системы. Движение электрона будет происходить тоже в этой плоскости, и для описания удобно использовать полярную систему координат (r, φ) с началом отсчета, совмещенным с осью симметрии системы. Тогда в любой точке пространства между катодом К и анодом А сила электростатического поля $\vec{F}_э$ имеет радиальное направление, а сила Лоренца $\vec{F}_м$ направлена перпендикулярно к касательной в данной точке траектории электрона. Векторная диаграмма сил представлена на рис. 1а, а схема разложения скорости частицы на компоненты – на рис. 1б.

Рассмотрим движение электрона в данных условиях. Запишем уравнение динамики вращательного движения электрона относительно оси, совпадающей с центром выбранной системы координат:

$$\frac{dL}{dt} = M, \quad (2)$$

где $L = mvr \cdot \sin \alpha = mv_\phi r$ – момент импульса электрона; $v_\phi = v \cdot \sin \alpha$ – тангенциальная составляющая скорости v ; α – угол между векторами r и v ; $M = F_\phi r$ – момент силы; составляющая силы Лоренца (см. рис. 1):

$$F_\phi = ev_r B = e \frac{dr}{dt} B. \quad (3)$$

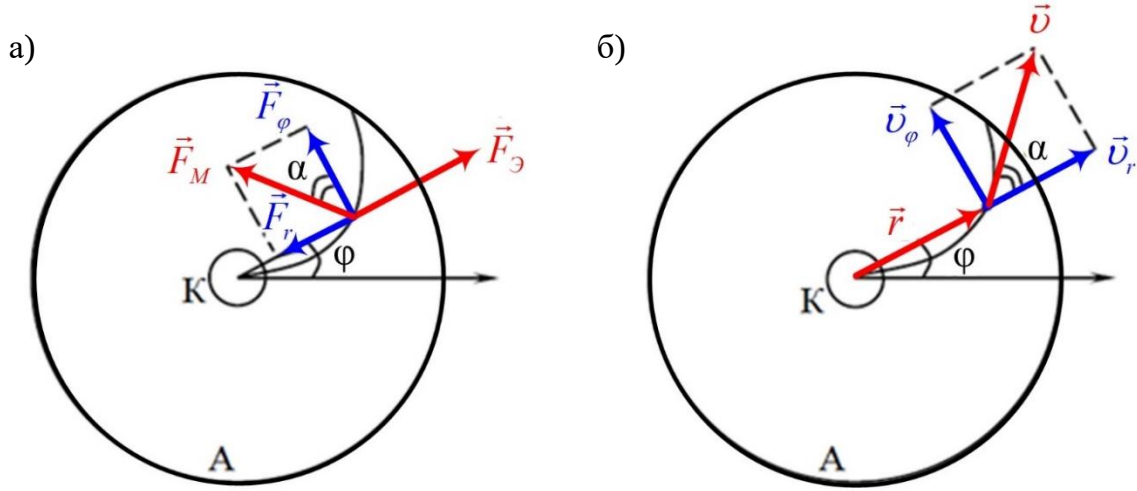


Рис. 1. (а) Силы, действующие на электрон, и (б) схема разложения скорости частицы на компоненты в магнетроне

С учетом вышесказанного уравнение (2) можно переписать следующим образом:

$$\frac{d}{dt}(mv_\phi r) = ev_r B = er \frac{dr}{dt} B = \frac{1}{2} eB \frac{d}{dt}(r^2). \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), имеем

$$mv_\phi r = \frac{1}{2} eBr^2 + \text{const}. \quad (5)$$

Значение постоянной интегрирования находим из начальных условий: $v = 0$ при $r = r_k$ (r_k – радиус катода), т. е.

$$\text{const} = -\frac{1}{2} eBr_k^2. \quad (6)$$

Тогда с учетом выражения (6) из (5) находим

$$v_\phi = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{B}{r} (r^2 - r_k^2). \quad (7)$$

По закону сохранения энергии приращение кинетической энергии электрона равно работе сил электрического поля:

$$\frac{m(\nu_\phi^2 + \nu_r^2)}{2} = eU. \quad (8)$$

где U – потенциал точки, в которой находится электрон относительно катода. Подставляя (6) в (7), имеем

$$eU = \frac{m}{2} \left\{ \nu_r^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B^2}{r^2} (r^2 - r_k^2)^2 \right\}. \quad (9)$$

Когда индукция магнитного поля достигает значения $B_{кр}$, называемого критическим, радиальная составляющая скорости вблизи анода становится равной нулю. Траектория движения электрона приобретает вид замкнутой окружности, и электрон не попадает на анод. Тогда уравнение (8) принимает вид

$$eU_a = \frac{m}{8} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \frac{B_{кр}^2}{r_a^2} (r_a^2 - r_k^2)^2. \quad (10)$$

где U_a и r_a – потенциал анода относительно катода и радиус анода соответственно. Из выражения (10) определяем e/m , т. е.

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2}. \quad (11)$$

Считая радиус катода малым с радиусом анода ($r_k \ll r_a$) выражение (10) можно упростить:

$$\frac{e}{m} \approx \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}. \quad (12)$$

Таким образом, зная радиус анода r_a и задавая анодное напряжение U_a , можно экспериментально установить критическое значение индукции $B_{кр}$ магнитного поля и определить величину удельного заряда электрона.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Основная идея метода магнетрона, применяемого в данной лабораторной работе, заключается в использовании двухэлектродной вакуумной лампы с такой же конфигурацией магнитного и электрического полей как в магнетроне – электровакуумном приборе, широко используемого в качестве генератора электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Электрическое поле создают с помощью двухэлектродной лампы (диода). Её электроды – анод и катод – имеют форму соосных (коаксиальных) цилиндров, и когда к ним прикладывают разность потенциалов,

вектор напряжённости электрического поля имеет радиальное направление (рис. 2).

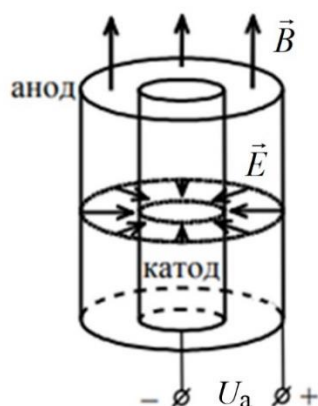


Рис. 2. Схема магнетрона

Магнитное поле создают соленоидом при пропускании по нему электрического тока. Лампа помещена внутри соленоида вдоль его оси, то есть вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля направлен вдоль оси электродов. Таким образом, магнитное и электрическое поле в магнетроне взаимно перпендикулярны. Электроны в лампе испускаются нагретым катодом и под действием электрического поля начинают двигаться к аноду. Напряжённость E максимальна у катода и с увеличением расстояния от него быстро уменьшается. Поэтому основное изменение скорости электронов происходит вблизи катода, и при дальнейшем движении их скорость будет изменяться незначительно. Так как в диоде радиус катода значительно меньше радиуса анода, то приближенно можно считать, что в кольцевом пространстве между анодом и катодом электроны движутся с постоянной скоростью. В лампе возникает анодный ток, величина которого зависит от анодного напряжения.

Если магнитное поле отсутствует, то при неизменном токе накала и стабильном анодном напряжении анодный ток имеет постоянное значение. Если магнитное поле отсутствует (ток в цепи соленоида равен нулю), то электроны, эмитированные катодом К, под действием электрического поля движутся на анод А радиально, и в анодной цепи возникает некоторый ток, зависящий от анодного напряжения и напряжения накала. Если, не меняя анодного напряжения и напряжения накала, приложить небольшое магнитное поле, то оно будет действовать на электроны и отклонять их перпендикулярно к плоскости, в которой лежат вектора $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

Под действием силы Лоренца характер движения электронов становится более сложным, а их траектория — криволинейной (рис. 3), но все электроны, в конечном счете, попадают на анод, и в анодной цепи будет протекать такой же ток, как в отсутствии магнитного поля.

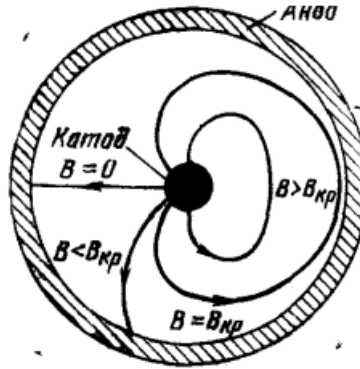


Рис. 3. Траектория электронов в магнетроне в зависимости от величины индукции магнитного поля

Величина индукции магнитного поля в центре соленоида конечного размера в зависимости от тока I_c , протекающего через него, рассчитывается по формуле

$$B = \mu_0 I_c n \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}}, \quad (13)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $n = N/l$ – число витков на единицу длины соленоида, N , l и d – число витков, длина и диаметр соленоида соответственно.

При наличии внешнего магнитного поля на движущийся электрон будет действовать магнитная составляющая силы Лоренца. Эта сила, будучи перпендикулярной к направлению движения электрона, выполняет роль центростремительной силы и вызывает движение по окружности. Радиус R этой окружности можно определить из второго закона Ньютона:

$$\frac{mv^2}{R} = evB, \quad (14)$$

то есть

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (15)$$

В слабом магнитном поле этот радиус довольно велик, поэтому траектория электронов искривляется незначительно, и они все достигают анода (рис. 3). На рис. 4 показан график зависимости анодного тока от магнитной индукции. Если $B < B_{кр}$, все электроны доходят до анода, и анодный ток имеет такое же значение, как и при отсутствии магнитного поля (горизонтальная часть графика). Если $B > B_{кр}$, то электроны перестают достигать анода, и ток через лампу становится равным нулю. При $B = B_{кр}$ анодный ток должен резко уменьшаться (штриховая линия на графике), однако в эксперименте такого явления не наблюдается. В реальных условиях эксперимента изменение силы анодного тока в области $B_{кр}$ может оказаться не резким, а достаточно плавным. Причин этому много:

неоднородность магнитного поля, некоаксиальность электродов в лампе, наличие начальных скоростей у термоэлектронов и т.д.

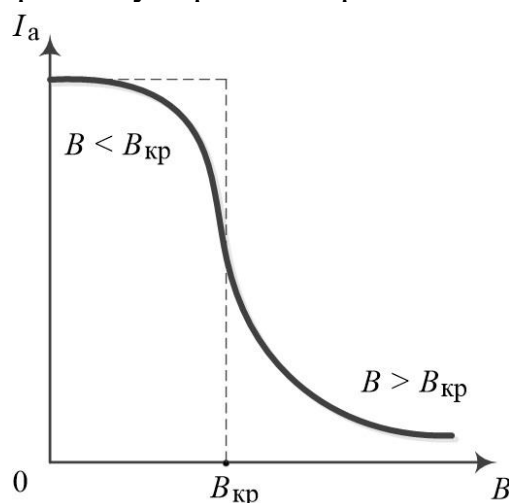


Рис. 4. Зависимость анодного тока от магнитного поля

И все же величина критического магнитного поля $B_{кр}$ соленоида, необходимого для расчета удельного заряда по формуле (13), может быть определена по резкому уменьшению силы анодного тока I_a в лампе при некотором значении силы тока $I_{с,кр}$ соленоида. Зависимость $I_a = f(I_c)$ называется сбросовой характеристикой, ее характерный вид приведен на рис. 5. Для нахождения критического значения силы тока $I_{с,кр}$ в соленоиде необходимо провести прямую к линейно спадающей части сбросовой характеристики $I_a = f(I_c)$ и найти точку ее пересечения с горизонтальной прямой, соответствующей минимальным значениям силы анодного тока I_{min} (рис. 5). Этот метод позволяет достаточно точно определить критическое значение силы тока $I_{с,кр}$ через точку перегиба сбросовой характеристики, однако в лабораторной работе значения тока $I_{a,min}$ наблюдаются при достаточно высоких значениях тока I_c , при которых установка начинает работать нестабильно. Поэтому значение силы тока $I_{с,кр}$ рекомендуется оценивать в работе как $0,85I_{c0}$, где значение тока I_{c0} определяется как точка пересечения прямой, проведенной к линейно спадающей части сбросовой характеристики $I_a = f(I_c)$, и оси абсцисс (рис. 5).

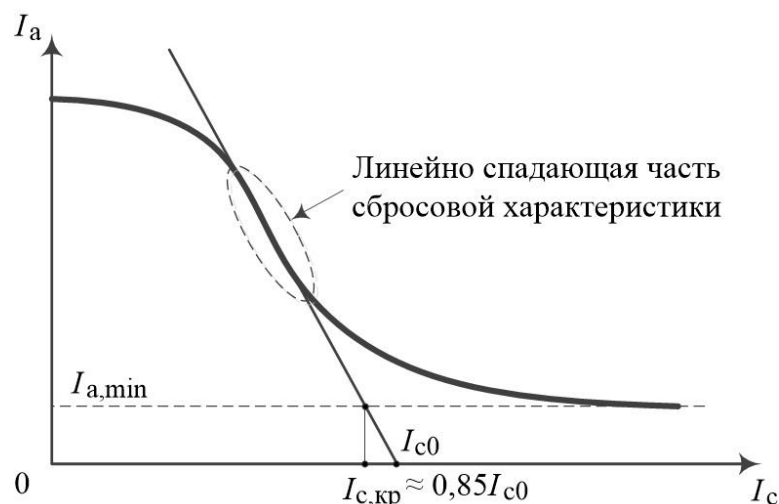


Рис. 5. Сбросовая характеристика анодного тока

Лицевая часть модуля «Магнетрон» представлена на рис. 6. Включение оборудования производится тумблером SA1 (подается напряжение между катодом и анодом и загорается красным светом индикатор НН1) и тумблером SA2 (подается напряжение на соленоид). С помощью регуляторов R1 и R2 задается величина анодного напряжения U_a и значение силы тока I_c , протекающего через соленоид, соответственно. Текущие значения силы анодного тока I_a , анодного напряжения U_a и силы тока I_c выводятся на электронное табло. Вращение регулятора FU1, управляющего предохранителем, производится только сотрудником лаборатории.

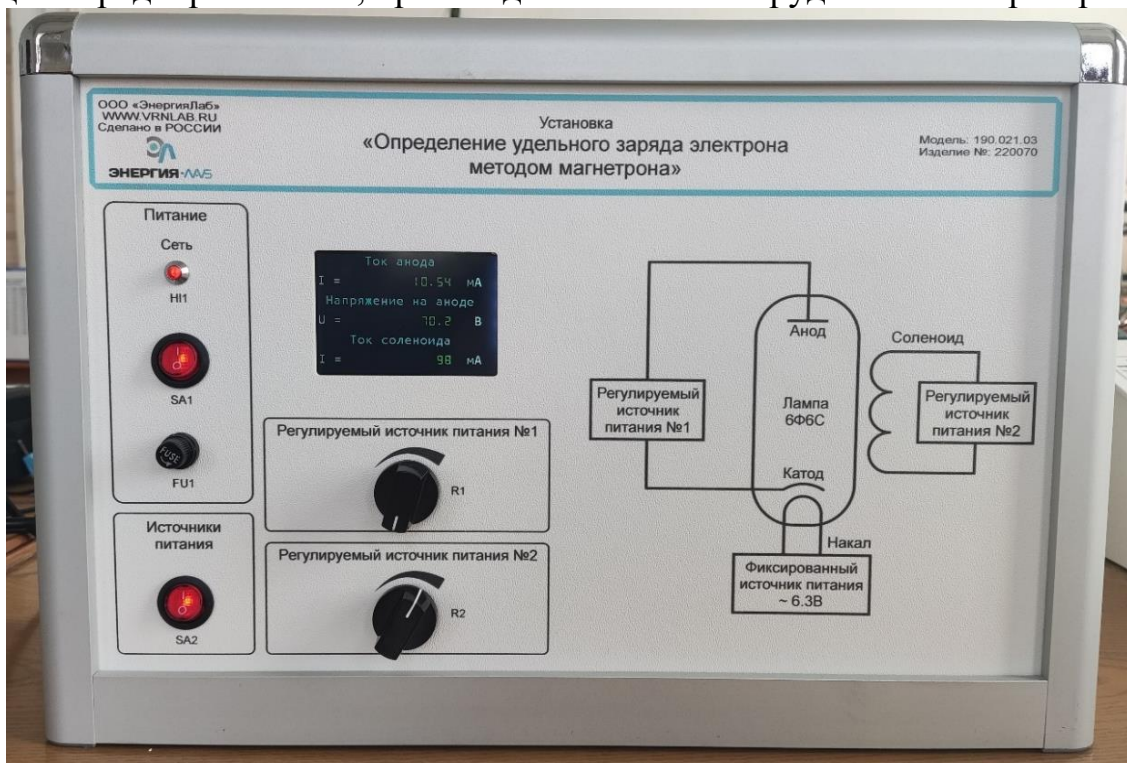


Рис. 6. Лицевая часть модуля «Магнетрон»

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Убедитесь, что оборудование отключено от сети электропитания: тумблер «Сеть» должен быть выключен.
2. Подключите модуль с помощью сетевого шнура к сети 220В.
3. Убедитесь, что все регуляторы на лицевой части модуля (рис. 6) установлены в минимальное положение (выкручены до упора против часовой стрелки).
4. Включите питание оборудования тумблером SA1 и затем тумблером SA2.
5. Регулятором R1 установите анодное напряжение на 60 В.
6. Проведите замеры значений анодного тока и тока соленоида, поворачивая регулятор R2 по часовой стрелке, изменяя ток соленоида I_c , через каждые 15 мА (до 500 мА) записывайте значения анодного тока и тока соленоида в таблицу 1.

Обратите внимание! Эксперимент не следует проводить длительное время, чтобы не допустить перегрева лампы и искажения параметров.

Таблица 1

Напряжение анода $U_a = 60 \text{ В}$		Напряжение анода $U_a = 70 \text{ В}$		Напряжение анода $U_a = 80 \text{ В}$	
$I_a, \text{ мА}$	$I_c, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мА}$	$I_c, \text{ мА}$	$I_a, \text{ мА}$	$I_c, \text{ мА}$

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Используя полученные данные в таблице 1, постройте сбросовые характеристики и определите критические значения силы тока $I_{c, \text{кр}}$ в соленоиде (см. рис. 5).
2. Для каждого критического значения силы тока в соленоиде рассчитайте критическую индукцию магнитного поля по формуле (13). Соленоид имеет длину $l = 100 \text{ мм}$ и диаметр $d = 80 \text{ мм}$, число витков $N = 2660$.
3. Вычислите величину e/m по формуле (12) для каждого критического значения индукции магнитного поля в соленоиде. Радиус анода $r_a = 4,2 \text{ мм}$.
4. Определите среднее значение удельного заряда e/m электрона.
5. Рассчитайте теоретическое значение величины e/m и сравните с экспериментальными значениями.
6. Сделайте вывод о проделанной работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дайте определение удельному заряду частицы.
2. Что представляет собой вакуумный диод?
3. Изобразите вольт-амперную характеристику вакуумного диода.
4. Что представляет собой магнетрон?
5. Как определяется сила, действующая на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях?
6. Какими величинами определяется отклонение электрона в электрическом и магнитном полях?
7. По какой траектории движется электрон, влетающий в магнитное поле?
8. В чем заключается принцип магнитной фокусировки?
9. В чем заключается метод Томсона для определения удельного заряда электрона?
10. В чем заключается метод магнетрона для определения удельного заряда электрона?
11. Какие кинематические характеристики изменяются при движении заряженной частицы под некоторым углом к силовой линии электростатического поля?
12. Какие кинематические характеристики изменяются при движении заряженной частицы под действием силы Лоренца?
13. Какие уравнения необходимо использовать для определения скорости заряженной частицы, приобретенной в электрическом поле?
14. Какие уравнения необходимо использовать для определения радиуса кривизны траектории электрона в магнитном поле?
15. От чего зависят вектор и модуль скорости движения электрона в магнетроне?
16. Покажите на рисунке форму траектории электрона в магнетроне в зависимости от величины магнитной индукции.
17. От каких величин зависит значение анодного тока магнетрона?
18. Какие уравнения используют при выводе расчетной формулы для определения удельного заряда электрона?

ЛИТЕРАТУРА

1. Детлаф А.А. Курс физики: учебник / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 9-е изд. стер.. – М. : Академия, 2014. – 720 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учебник / Т.И. Трофимова. – 20-е изд., стер.. – М. : Академия, 2014. – 542 с.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики Т.3: Электричество / Д.В. Сивухин. – 6-е изд., стер.. – М. : Физматлит, 2015. – 656 с.

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Методические указания к выполнению лабораторной работы 2-01

Составитель

Святкин Леонид Александрович

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати _____ 2023. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ ____ . Тираж ____ экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический уни-
верситет



Система менеджмента качества



Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru