

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет
Кафедра общей физики

Строева Полина Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Определение удельного заряда электрона магнетронным методом

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №18312

Научный руководитель:

С. Е. Краснопевцев

Оценка научного руководителя

«_____» _____ декабря _____ 2019 г.

Преподаватель практикума:

к. ф.-м. н., Ю. Ю. Чопорова

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ декабря _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к. т. н., В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ декабря _____ 2019 г.

Аннотация

Целью работы являлась доработка имеющейся на электромагнитном практикуме НГУ лабораторной установки 2.1 с целью добавления возможности определения удельного заряда электрона магнетронным методом. Проведенные эксперименты показали нецелесообразность сложившегося подхода. В итоге была разработана новая лабораторная установка, проведены эксперименты по определению оптимальных параметров и режимов работы оборудования. Проведены эксперименты по снятию сбросовых характеристик электронной вакуумной лампы в продольном магнитном поле. На основании полученных данных вычислен удельный заряд электрона. Полученное значение хорошо согласуется с известными значениями. Результаты работы позволят расширить круг проводимых лабораторных исследований на практикуме по электричеству и магнетизму НГУ.

Ключевые слова: сила Лоренца, движение электронов, скрещенные магнитное и электрическое поля, магнетрон, электрическое поле, магнитное поле, вакуумный диод, траектория электрона, анодный ток, соленоид.

Работа выполнена в межфакультетской лаборатории электричества и магнетизма кафедры общей физики физического факультета НГУ.

Оглавление

1. Введение	4
2. Экспериментальная установка и теоретическая база	6
3. Проведение эксперимента	9
4. Обработка экспериментальных данных	12
5. Результаты и выводы	14
6. Список литературы	15

1. Введение

Отношение величины заряда электрона к его массе покоя, определению которой и посвящена эта работа, можно отнести к основным физическим постоянным, наряду с собственно его зарядом и массой.

Существует множество способов определения удельного заряда электрона. В данной работе рассматривается способ, который можно реализовать относительно просто. Для этого необходимо иметь вакуумную двухэлектродную лампу, соленоид и электроизмерительные приборы. Указанный метод получил свое название благодаря двухэлектродному вакуумному прибору, помещенному в магнитное поле – магнетрону.

Первоначальной целью данной работы являлась доработка имеющейся на электромагнитном практикуме НГУ лабораторной установки 2.1 "Законы термоэмиссии" с целью добавления возможности определения удельного заряда электрона магнетронным методом. Предполагалось добавить в установку возможность помещения в неё соленоида, подключенного к внешнему источнику постоянного тока. Такая возможность была предусмотрена еще при модернизации этой установки. Однако ряд проведенных экспериментов показал нецелесообразность такого подхода. Это было связано с относительно малым размером вакуумного диода, используемого в указанной лабораторной установке.

Суть проблемы в следующем. Магнетронный способ предполагает, что траектории радиального движения электронов, под действием магнитного поля, искривляются настолько, что они перестают касаться анода и возвращаются на катод. Это в свою очередь означает, что потребуется создать магнитное поле достаточной для этого величины. Проведенные эксперименты при различных анодных напряжениях вакуумного диода показали, что для достижения таких траекторий необходима довольно высокая напряженность создаваемого магнитного поля. Радиус цилиндрического анода используемого вакуумного диода 2ДЗБ составляет всего 0,7 мм. Изготовленный соленоид, соответствующий раз-

мерам установки, не позволил достичь необходимой напряженности поля. Проходящий по нему постоянный ток приводил к быстрому и сильному нагреву.

Представлялось два пути выхода из этой ситуации.

Первый из них – это использование импульсного режима протекания тока в соленоиде. В этом случае средний ток мог бы составлять совсем небольшую величину, а амплитуда импульсов тока могла быть достаточной. Для этого можно было периодически разряжать на соленоид конденсатор. Но в этом случае полностью теряется преимущество в элегантности снятия вольт-амперной характеристики вакуумного диода, с использованием системы развертки осциллографа, при имеющейся схеме подключения приборов.

Второй путь – полностью новая, отдельная экспериментальная установка. Это подразумевает, в первую очередь, использование другого типа вакуумного диода, который имел бы значительно больший радиус анода. Такой лампой оказался кенотрон (высоковольтный вакуумный диод) 2Ц2С. Радиус анода составляет 9,5 мм, что более, чем на порядок превышает аналогичный размер лампы 2ДЗБ (0,7 мм). В итоге, именно этот вариант и был реализован.

2. Экспериментальная установка и теоретическая база

Основным элементом экспериментальной установки является термоэлектронная вакуумная лампа. Она состоит из concentric цилиндрической катодно-анодной конфигурации и цепи накала катода (рис. 1).

Электроды 2Ц2С имеют следующие геометрические характеристики: $R_a = 9,5$ мм – радиус анода, $R_k = 0,9$ мм – радиус катода.

Лампа помещена внутрь соленоида таким образом, чтобы катодно-анодный узел располагался ровно по центру длины соленоида.

Основной физической концепцией, используемой в данном эксперименте, является движение заряженной частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Электроны, ускоренные электрическим полем от внутреннего цилиндрического катода к внешнему анодному цилиндру, под действием перпендикулярного магнитного поля, создаваемого соленоидом, вынуждены следовать по изогнутой траектории. Если магнитное поле достаточно сильное, траектории электронов будут замкнутыми обратно на катод. Величина магнитного поля, при котором траектория электрона едва касается анода, называется критической (Рис. 2).

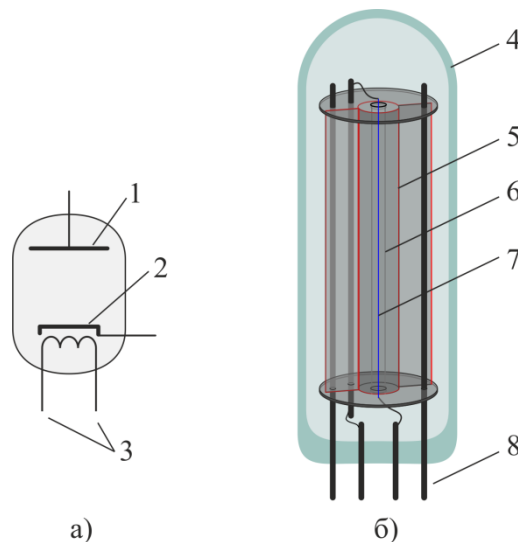


Рис. 1. Устройство вакуумного диода:
а) обозначение на схеме, б) внешний вид,
1 – анод, 2 – катод, 3 – клеммы и спираль накала,
4 – колба с вакуумом, 5 – анод, 6 – катод, 7 –
нить накала, 8 – внешние выводы.

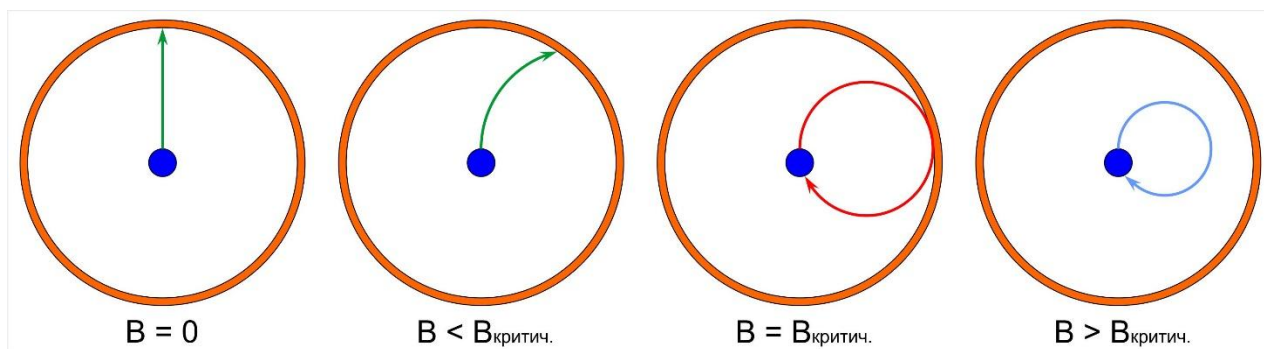


Рис. 2. Траектория электрона от катода к аноду внутри вакуумного диода при различной напряженности магнитного поля

Электрон является носителем элементарного отрицательного заряда e ($e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Отношение его заряда к массе e/m называется удельным зарядом электрона. Удельный заряд может быть экспериментально определён различными методами. Все они основаны на поведении электрона в электрическом и магнитном полях.

Уравнение движения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях имеет вид:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} + e\mu_0[\vec{v} \times \vec{H}] \quad (1)$$

где m – масса частицы; e – величина заряда частицы; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная.

Движение электронов происходит в кольцевом пространстве между катодом и анодом двухэлектродной электронной лампы. Нить накала лампы (катод) располагается вдоль оси цилиндрического анода, так что электрическое поле между катодом и анодом имеет радиальное направление. Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле, параллельное оси лампы и перпендикулярное линиям электрического поля.

В электрическом поле напряженностью $\vec{E}$ на электрон действует сила

$$\vec{F} = e\vec{E}, \quad (2)$$

направленная против поля и сообщающая электрону ускорение.

Напряженность электрического поля в лампе цилиндрической формы имеет только радиальную компоненту E_r . Следовательно, сила, действующая на электрон в таком поле, направлена по радиусу, поэтому

$$F_r = eE, \quad F_z = F_\phi = 0 \quad (3)$$

Под действием этой силы электрон проходит расстояние между точками с разностью потенциалов U . Конечная скорость электрона $\vec{v}$ будет определена из закона сохранения энергии [6, стр. 414]:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (4)$$

Движение электрона в однородном магнитном поле происходит под действием силы Лоренца, которая в нашем эксперименте перпендикулярна скорости электрона и направлению магнитного поля. Модуль силы Лоренца

$$F = e \dot{v} B \sin \alpha \quad (5)$$

Под действием силы Лоренца электрон приобретает центростремительное ускорение и начинает двигаться по окружности радиуса R . И, следовательно, если вектор скорости электрона перпендикулярен направлению магнитного поля, можно выразить радиус окружности, по которой движется электрон:

$$evB = \frac{mv^2}{R} \quad (6)$$

отсюда:

$$R = \frac{v}{\left(\frac{e}{m}\right)B} \quad (7)$$

Видно, что радиус окружности зависит от отношения e/m . При высоких скоростях электрона, радиус траектории больше, чем при малых.

Строгий вывод выражения для получения удельного заряда электрона приводит к выражению [3, стр.101]:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{R_a^2 B_{кр}^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{R_{\kappa}^2}{R_a^2}\right)^2} \quad (8)$$

где U – анодное напряжение, R_a – радиус анода, R_{κ} – радиус катода, $B_{кр}$ – критическая индукция магнитного поля.

Критическая индукция магнитного поля определяется критическим током соленоида [9, стр.139]:

$$B_{кр} = \mu_0 \frac{n}{l} I_{кр} \quad (9)$$

где $I_{кр}$ – ток в соленоиде, n – число витков соленоида, l – длина соленоида, μ_0 – магнитная постоянная.

Для удобства вычислений можно подставить формулу (9) в формулу (8):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{\left(R_a \mu_0 \frac{n}{l} I_{кр}\right)^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{R_{\kappa}^2}{R_a^2}\right)^2} \quad (10)$$

3. Проведение эксперимента

Ключевым элементом экспериментальной установки является вакуумный диод, помещенный внутрь соленоида (рис. 3). Катушка имеет следующие параметры: количество витков – 2500, длина катушки – 0,115 м.

Важно расположить лампу таким образом, чтобы катодно-анодная группа оказалась в геометрическом центре соленоида. В этом случае межэлектродное пространство будет находиться в зоне максимальной напряженности с минимальным влиянием краевых эффектов. Схема подключения приборов приведена на рис. 4.

Особенность выбранного вакуумного диода заключается в том, что он имеет значительную инерционность нагрева катода в зависимости от тока накала. Это необходимо учитывать в эксперименте и, в случае изменения тока накала, давать время на установление температуры.

В первую очередь включается ток накала катода, затем подается анодное напряжение. Когда катод начнет нагреваться, начинается эмиссия электронов и миллиамперметр фиксирует появление анодного тока. Если теперь подать ток на соленоид и постепенно увеличивать его, то в определенный момент мы заметим уменьшение анодного тока. Продолжая увеличивать ток соленоида, мы увидим, как анодный ток уменьшится практически до нуля.

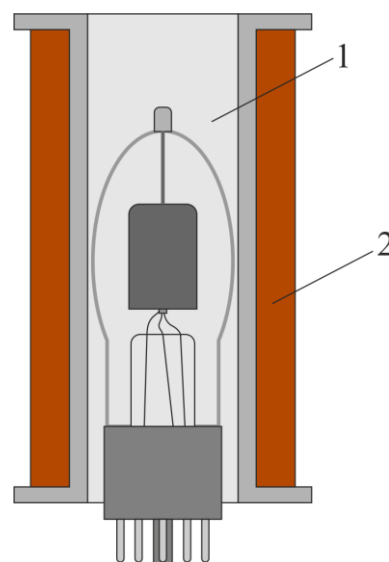


Рис. 3. Рабочее положение вакуумного диода 2Ц2С (1) в соленоиде с током (2).

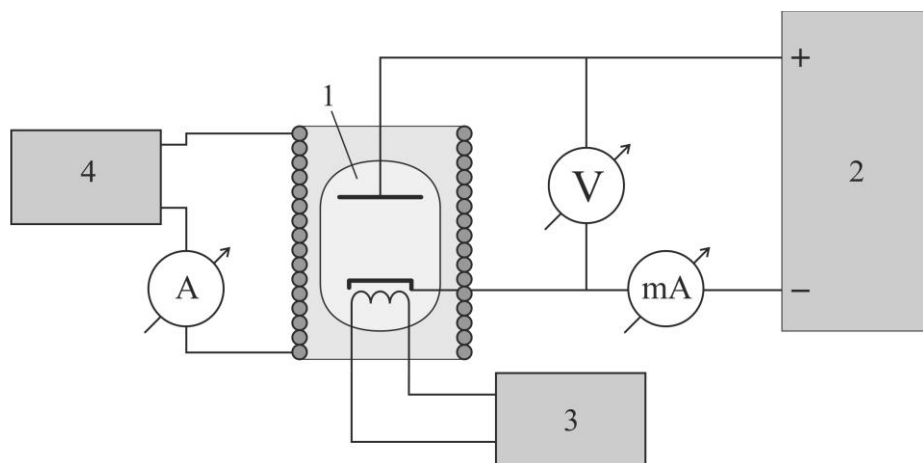


Рис. 4. Схема подключения приборов: 1 – вакуумный диод, 2 – регулируемый источник анодного напряжения, 3 – регулируемый источник накала катода, 4 – регулируемый источник тока соленоида.

Значение тока соленоида, соответствующее максимальному спаду тока анода, называется критическим током соленоида. Зависимость тока анода от тока соленоида (напряженности магнитного поля), называется "сбросовой характеристикой". Замечена зависимость изменения критического тока от величины анодного напряжения. Чем выше анодное напряжение, тем больше критический ток соленоида.

На рис. 5 приведена сбросовая характеристика вакуумного диода при анодном напряжении $U_a = 40,0$ В (синий график). Оранжевый график представляет собой производную сбросовой характеристики, отображенную с обратным знаком. Она позволяет точно определить точку наибольшей скорости спада тока анода, соответствующую критическому току соленоида. Как видно, значение критического тока составляет: $I_{кр.} = 0,2$ А.

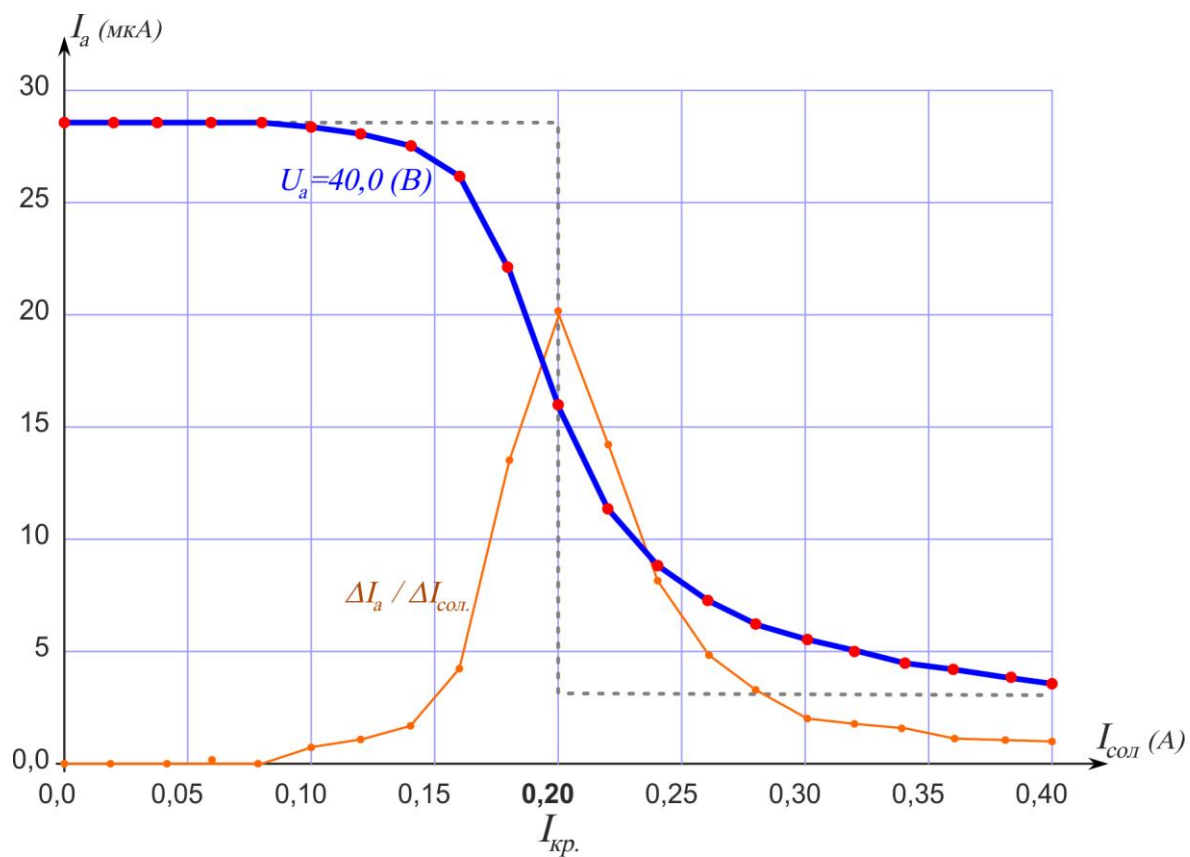


Рис. 5. Сбросовая характеристика вакуумного диода в магнитном поле соленоида.

4. Обработка экспериментальных данных

Подставляя известные и определенные в эксперименте значения в формулу (10), получим искомую величину удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{(R_a \mu_0 \frac{n}{l} I_{кр})^2} \cdot \frac{1}{(1 - \frac{R_k^2}{R_a^2})^2} = \frac{8(40 \pm 0.2)}{(0.0095 \cdot 1.25 \cdot 10^{-6} \frac{2500}{0.115} \cdot 0.2)^2} \cdot \frac{1}{(1 - \frac{0.0009^2}{0.0095^2})^2} =$$
$$= \frac{320 \pm 1.6}{2.69408 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{1}{0.98213} = 1.01819 \cdot (1.18779 \cdot 10^{11} \pm 5.939 \cdot 10^8) = 1.2094 \cdot 10^{11} \pm 6.0471 \cdot 10^8$$

Результат оказался на 31% меньше известного табличного значения искомой величины: $\frac{e}{m} = -1.75882 \cdot 10^{11} \frac{Кл}{кг}$. Сделаем несколько предположений относительно возможных источников погрешностей, повлиявших на результат.

В первую очередь, обратим внимание на то, что энергии термоэлектронов распределены по скоростям. Особенно широко это распределение выражено при высоких температурах. Температура катода электронных вакуумных ламп может достигать тысячи градусов и даже выше. Это приводит к "размытию" идеальной сбросовой характеристики, которая изображена на рис.5 серой пунктирной линией. Идеальной сбросовой характеристикой будет только в случае равенства энергии всех термоэлектронов. В результате размытия сбросовой характеристики увеличивается вероятность ошибочного определения критического тока соленоида, а, следовательно, и критической индукции магнитного поля.

Еще одной причиной искажения теоретической картины явления может стать, например, использование ферромагнитных материалов для изготовления анода лампы. Кроме внесения искажения в магнитное поле, в этом случае может еще проявляться пересечение точки Кюри, при нагреве, и неожиданное исчезновение у материала анода ферромагнитных свойств. Катоды прямого накала изготавливаются из никеля. У этого металла точке Кюри соответствует температура

358 °С. Если и анод изготавливается из никеля, то желательно предварительно

прогреть его до температуры выше точки Кюри, подачей на лампу высокого анодного напряжения.

Еще одной причиной отклонений в измерениях может оказаться изменение температуры катода при увеличении числа термоэлектронов, вернувшихся обратно на катод, когда индукция магнитного поля становится выше критической. Это изменение температуры катода вызовет увеличение термоэмиссии электронов, которая отразится на сбросовой характеристике.

Погрешность вычисления удельного заряда электрона в данной работе также обусловлена систематической погрешностью измерительного прибора – вольтметра, которая составляет 0,2 В, что и было учтено при расчетах.

5. Результаты и выводы

В ходе работы я ознакомилась с одним из методов определения удельного заряда электрона – магнетронным методом. Мною сняты сбросовые вольтамперные характеристики вакуумной лампы в продольном осевом магнитном поле. По этим характеристикам определен критический ток соленоида, создающего это магнитное поле. Вычислив напряженность магнитного поля в центре соленоида, я определила соотношение заряда электрона к его массе при фиксированном анодном напряжении. Полученное значение хорошо согласуется с известными значениями.

В ходе выполнения работы разработана новая лабораторная установка, проведены эксперименты по определению оптимальных параметров и режимов работы оборудования. Результаты проведенной работы позволят расширить круг проводимых лабораторных исследований на практикуме по электричеству и магнетизму НГУ.

6. Список литературы

1. Богуславский С. А. Избранные труды по физике. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1961 г.
2. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. Издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1971.
3. Солоухин Р. И. Методы физических измерений. Лабораторный практикум по физике. Издательство "Наука" Сибирское отделение, Новосибирск, 1975 г.
4. Гольдин Л. Л. Лабораторные занятия по физике. Москва "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1983 г.
5. Иверонова В. И. Физический практикум. Электричество и оптика. 2-е изд. Издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1968 г.
6. Калашников С. Г. Электричество. Москва, Физматлит, 2003.
7. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. т.2. Электричество и магнетизм, Москва, Государственное издательство физико-математической литературы, 1962.
8. Сивухин Д. В. Общий курс физики. т.3, Электричество. Москва, Физматлит МФТИ, 2004.
9. Савельев И. В. Курс общей физики. т.3, Электричество. М.: Издательство "Наука", Главная редакция физико-математической литературы, 1970.