

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»

Кафедра общей и технической физики

# **ФИЗИКА**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА МЕТОДОМ МИЛЛИКЕНА**

*Методические указания к лабораторной работе  
для студентов всех специальностей и направлений  
подготовки бакалавриата*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2016

**ФИЗИКА. Измерение элементарного электрического заряда методом Милликена:** Методические указания к лабораторной работе. *Н.С. Пицелко, С.С. Прошкин.* Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2016, 17 с.

Лабораторный практикум курса общей физики по электричеству и магнетизму предназначен для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата Национального минерально-сырьевого университета «Горный». С помощью методических указаний студент имеет возможность ознакомиться с физическими явлениями, методикой выполнения лабораторного исследования и правилами оформления лабораторных работ. Выполнение лабораторной работы позволит студенту сформировать следующие компетенции: ОПК-1; ОПК-2; ПК-1 и ПК-2.

Методические указания предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата.

Табл. 2. Ил. 7. Библиогр.: 6 назв.

Научный редактор проф. *Н.С. Пицелко*

© Национальный минерально-сырьевой  
университет «Горный», 2016 г.

## 1. Введение

Во второй половине XIX века физики активно изучали феномен катодных лучей с помощью катодно-лучевой трубки, представлявшей собой герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом. С двух сторон трубки были впаяны электроды: отрицательный катод и положительный анод. При подаче на электроды высокого напряжения разреженный газ в трубке начинал светиться, причем при низких напряжениях свечение наблюдалось лишь в области катода, а при повышении напряжения газовый разряд наблюдался по всему объему трубки. Однако при откачивании газа из трубки, начиная с некоторого момента, свечение исчезало уже в области катода, сохраняясь около анода. Это свечение ученые называли *катодными лучами*.

Причина возникновения катодных лучей была неясна, поэтому к концу 1880-х годов дискуссия об их природе приняла острый полемический характер. Так, многие немецкие физики придерживались мнения, что катодные лучи представляют собой, подобно свету, волновые возмущения невидимого эфира. В свою очередь английские ученые считали, что катодные лучи состоят из ионизированных молекул или атомов самого газа.

Сторонники молекулярной гипотезы указывали на тот факт, что катодные лучи отклоняются под воздействием магнитного поля, в то время как на световые лучи магнитное поле воздействия не оказывает. Следовательно, они должны состоять из заряженных частиц. С другой стороны, сторонники корпускулярной гипотезы никак не могли объяснить ряда явлений, в частности обнаруженного в 1892 году эффекта практически беспрепятственного прохождения катодных лучей через тонкую алюминиевую фольгу.

С целью разрешить указанные противоречия в 1897 году английский физик Дж. Дж. Томсон (1856–1940) поставил серию экспериментов, в которых использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку. Ее конструкция была дополнена электрическими катушками, создававшими внутри трубки магнитное поле, и набором конденсаторов, создававших внутри трубки электрическое поле.

Благодаря этому появилась возможность исследовать поведение катодных лучей под воздействием одновременно как магнитного, так и электрического поля.

В результате Томсон доказал, что:

1. катодные лучи отклоняются в магнитном поле в отсутствие электрического поля;
2. катодные лучи отклоняются в электрическом поле в отсутствие магнитного поля;
3. при одновременном действии электрического и магнитного полей, ориентированных в направлениях, вызывающих по отдельности отклонения в противоположные стороны, катодные лучи распространяются прямолинейно, то есть действие двух полей может взаимно компенсироваться.

Также Томсон выяснил, что соотношение между электрическим и магнитным полями, при котором их действие уравнивается, зависит от скорости, с которой движутся частицы. Проведя ряд измерений, Томсон определил скорость движения катодных лучей, которая оказалось значительно меньше скорости света. Этот факт доказывал, что катодные лучи могут быть только частицами, поскольку любое электромагнитное излучение, включая сам свет, распространяется со скоростью света. Эти неизвестные частицы Томсон назвал «электронами».

Об открытии новой частицы Томсон доложил на заседании Лондонского королевского общества 30 апреля 1897 г. (За это открытие Дж. Дж. Томсон был удостоен Нобелевской премии по физике в 1906 г.)

Стоит отметить, что открытие Томсона многим ученым того времени показалось фантастическим, поскольку в конце XX века большое число маститых ученых не хотело признавать гипотезу об атомарном строении материи. Поэтому поверить в существование частицы еще меньшей, чем атом, физики того времени просто не могли.

Настоятельно возникла необходимость провести эксперимент, который бы наглядно доказывал существование электрона, например, опыт по измерению заряда частицы. Значительное количество попыток провести такие измерения предпринял сам

Дж. Дж. Томсон, но после десяти лет работы ассистент Томсона Г. Вильсон сообщил, что «после одиннадцати различных измерений они получили одиннадцать различных результатов».

В установке Томсона и его коллег наблюдения проводились за поведением облака из водяных капель, заряженных электричеством. В камере, из которой был частично откачан воздух, создавалось облако пара. К верхней части камеры подводился ток. После того как в водяном паре устанавливалось равновесие, сквозь туман пропускались рентгеновские лучи, в результате чего водяные капли приобретали заряд. Затем к камере сверху и снизу прикладывалось однородное электрическое поле так, чтобы электрическая сила была направлена вверх и уравновешивала силу тяжести. Если капля окажется в состоянии безразличного равновесия, из второго закона Ньютона можно рассчитать ее заряд. Однако физики никак не могли создать установку, при помощи которой можно было бы заниматься исследованиями отдельных частиц. К тому же капли водяного пара интенсивно испарялись, что мешало проводить наблюдения.

В это же время в Кембридже работал молодой американский аспирант Роберт Милликен, который сумел разрешить все описанные выше проблемы. Во-первых, Милликен использовал в установке Томсона батарею собственной конструкции на 10 кВ, которая создавала поле, достаточно сильное, чтобы удерживать верхнюю часть облака водяных капель в подвешенном состоянии. Это позволило рассеивать облако капель и от него оставалось очень небольшое число частиц, масса и электрический заряд которых находились в идеальном равновесии. Во-вторых, в 1909 году Милликен заменил капли водяного пара каплями масла, которые практически не испарялись за время наблюдения (рис. 1, 2).

Сначала Милликен измерял максимальную скорость капель, т. е. скорость, при которой сила тяжести, действующая на капли, уравновешивается силой сопротивления воздуха. По этой скорости ученый определил объем и массу капель аэрозольной взвеси.

В дальнейшем при распылении капель в присутствии электростатического поля, они оставались в подвешенном состоянии достаточно долго, поскольку сила тяжести уравновешивалась электростатической силой.

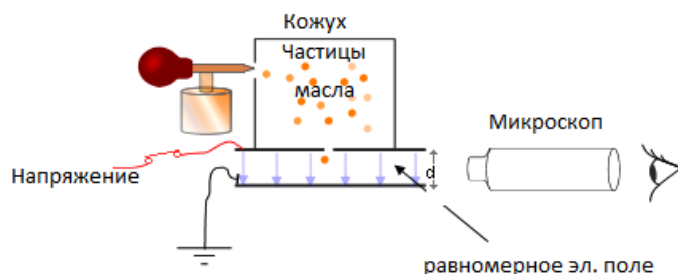


Рис. 1. Схема экспериментальной установки Милликена



Рис. 2. Фотография оптической части установки Милликена

Опыт Милликена был крайне трудоемок. Так, например, ученому приходилось на протяжении всех пяти лет непрерывного наблюдения постоянно измерять и учитывать влажность воздуха, атмосферное давление и температуру.

В результате Милликену удалось измерить заряд электрона, о чем он доложил научному сообществу осенью 1910 г, и сразу же

оказался в центре внимания физиков всего мира. Ученые немецкой школы, включая Рентгена, полностью изменили свой взгляд на строение материи. Представитель этой школы, великий ученый в области физической химии Оствальд, в 1912 году писал: «Теперь я убежден... Полученные опытным путем доказательства, которые люди безуспешно искали в течение сотен и тысяч лет, дают возможность даже самому осторожному ученому говорить о том, что теория атомного строения вещества экспериментально доказана».

Значение заряда электрона в опыте Миллиkena 1911 года получилось равным  $1,5924 \cdot 10^{-19}$  Кл, что на 1 % отличается от современного значения в  $1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл

В 1923 г Р.А. Милликен (1868-1953) получил Нобелевскую премию по физике за работу по определению элементарного заряда и исследованию фотоэлектрического эффекта.

## **2. Теоретические основы лабораторной работы**

В пространство между двумя пластинами плоского конденсатора под напряжением Милликен впрыскивал мельчайшие заряженные капли масла, которые могли находиться в неподвижном состоянии в определенном электрическом поле.

Согласно основным представлениям современной электронной теории заряд какого-либо тела возникает в результате изменения содержащегося в нем числа электронов (или положительных ионов, заряд которых равен или кратен заряду электрона). Вследствие этого заряд любого тела должен изменяться только скачкообразно и притом такими порциями, которые содержат целое число зарядов электрона.

Опыты Миллиkena наглядно доказали дискретный характер изменения электрического заряда и тем самым подтвердили существование электрона.

Если облучить пространство между обкладками конденсатора рентгеновским или ультрафиолетовым излучением, то за счет фотоэффекта масляная капля приобретет некоторый заряд. Обычно знак заряда положителен, так как капля при фотоэффекте теряет электроны. Иногда к капле могут «прилипать» электроны, образуя-

щиеся при ионизации молекул воздуха, и тогда знак заряда капли отрицателен. Вследствие малого размера капли величина ее заряда невелика: от нескольких до десяти зарядов электрона.

На заряженную каплю, находящуюся между пластинами конденсатора действуют три силы: сила тяжести  $mg$ ; сила со стороны электрического поля  $F_{\mathcal{E}}$ ; сила вязкого трения со стороны воздуха  $F_C$ ; выталкивающая сила Архимеда  $F_A$  (рис. 3).

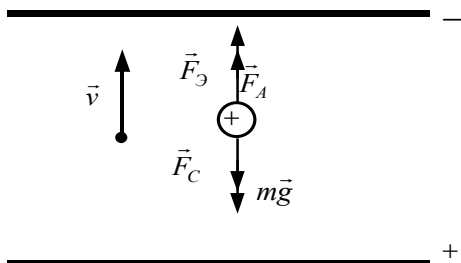


Рис. 3. Силы, действующие на каплю в опыте Милликена

Сила сопротивления вязкой среды при движении сферической капли определяется законом Стокса:

$$F_C = 6\pi\eta r v, \quad (1)$$

где  $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5}$ , кг/(м·с) – вязкость воздуха;  $r$  – радиус капли;  $v$  – скорость установившегося движения капли.

Выталкивающая сила Архимеда может быть определена по формуле

$$F_A = \rho_2 V g, \quad (2)$$

где  $\rho_2 = 1,293$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$  – объем сферической капли;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Сила тяжести равна

$$mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g, \quad (3)$$

где  $\rho_1 = 1,03 \cdot 10^3$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность масла.



Сила, действующая на каплю со стороны электрического поля плоского конденсатора

$$F_{\text{э}} = QE = Q \frac{U}{d}, \quad (4)$$

где  $Q$  – заряд капли;  $E$  – напряженность электрического поля;  $U$  – напряжение на обкладках конденсатора;  $d = (2,50 \pm 0,01)$ , мм – расстояние между обкладками конденсатора.

Когда заряженная капля попадает в электрическое поле, то сила сопротивления вязкого трения мала, и вначале капля движется ускоренно под действием сил  $mg$  и  $F_{\text{э}}$ . Затем сила сопротивления возрастает, и ускорение капли уменьшается до тех пор, пока не устанавливается равномерное движение. Время установления равномерного движения (время релаксации) зависит от отношения подвижности капли  $b = 6\pi\eta r$  к силе тяжести: чем больше это отношение, тем быстрее устанавливается движение с постоянной скоростью. Поскольку для малых капель время релаксации мало, можно с большой степенью точности считать, что капелька с самого начала движется равномерно. Следовательно

$$qE = mg + 6\pi\eta rv, \quad (5)$$

где  $v$  – установившаяся скорость масляной капли в электрическом поле.

Таким образом, если радиус капли известен, можно найти ее заряд. Милликен для нахождения радиуса капли измерял скорость равномерного падения капли в отсутствие электрического поля. Поскольку такой опыт крайне трудоемок и продолжителен, в данной лабораторной работе предложен другой способ. Если наблюдать за равномерным движением **одной и той же капли** при ее падении и подъеме при изменении полярности обкладок конденсатора, то из условия равновесия сил можно записать следующие формулы:

$$v_1 = \frac{1}{6\pi\eta r} \left( QE + \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_1 - \rho_2) \right), \quad (6)$$

где  $v_1$  – скорость равномерного падения капли;

$$v_2 = \frac{1}{6\pi\eta} \left( QE - \frac{4}{3} \pi r^3 g(\rho_1 - \rho_2) \right), \quad (7)$$

где  $v_2$  – скорость равномерного подъема капли.

Комбинируя выражения (6) и (7) можно найти формулы для вычисления заряда и радиуса капли

$$Q = C_1 \frac{v_1 + v_2}{U} \sqrt{v_1 - v_2}, \quad (8)$$

где  $C_1 = \frac{9}{2} \pi d \sqrt{\frac{\eta^3}{g(\rho_1 - \rho_2)}} = 2,73 \cdot 10^{-11}$ , кг·м/(м·с)<sup>1/2</sup>;

$$r = C_2 \sqrt{v_1 - v_2}, \quad (9)$$

где  $C_2 = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta}{g(\rho_1 - \rho_2)}} = 6,37 \cdot 10^{-5}$ , (м·с)<sup>1/2</sup>.

### 3. Описание экспериментальной установки

**Цель работы:** Определение величины элементарного заряда в опыте Милликена на основе измерения скорости движения заряженных капель масла, находящихся в однородном электрическом поле конденсатора. Измерения проводятся в зависимости от напряжения между пластинами конденсатора.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из источника питания постоянного тока (0...600 В) (1); вольтметра (2); микрометра с ценой деления 1 мм на 100 делений (3); двух секундомеров (4); переключателя для изменения полярности напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора (5); калибровочных стекол 18х18 мм (6); установки Милликена (7); соединительных проводов.

Источник питания имеет четыре выхода: фиксированный (300 В) и варьруемый (от 0 до 300 В), чтобы можно было получить напряжение больше 300 В. Вращением регулятора напряжения (рис.5.поз.2) по часовой стрелке можно плавно изменять напряжение от 0 до 300 В.

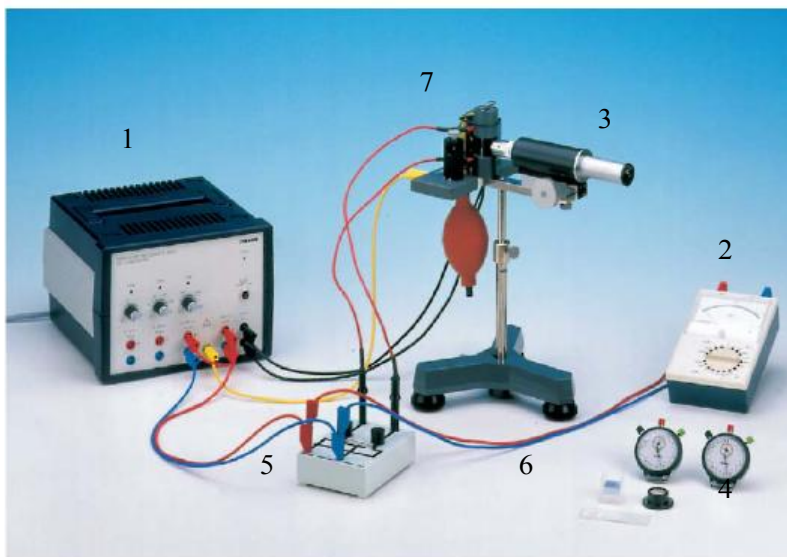


Рис. 4. Установка для измерения элементарного заряда

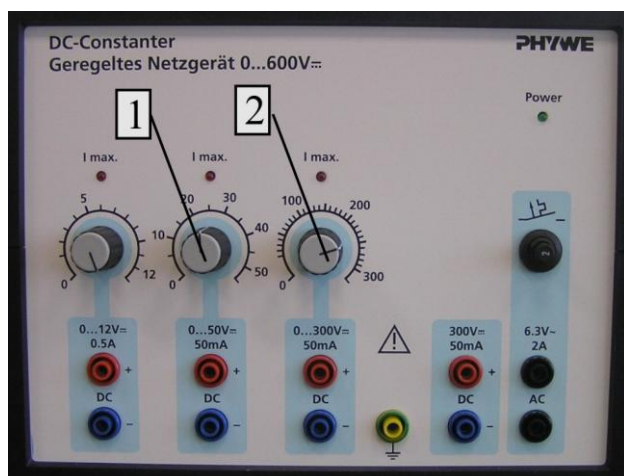


Рис. 5. Вид передней панели источника питания  
1 – ручка регулирования напряжения (0...50) В;  
2 – ручка регулирования напряжения (0...300) В.

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Опыт рекомендуется выполнять вдвоем. Соберите установку, как показано на рисунке 4.

Соедините фиксированный (300 В) и регулируемый (от 0 до 300 В) выходы источника напряжения, чтобы можно было получить напряжение выше 300 В.

Через переключатель направления поля источник соединяется с установкой Милликена. Параллельно присоединяется вольтметр. Оптическую систему установки Милликена следует подсоединить к выходу переменного напряжения 6,3 В источника напряжения. **При выполнении работы следует учитывать, что микроскоп формирует перевернутое изображение (рис. 6).**

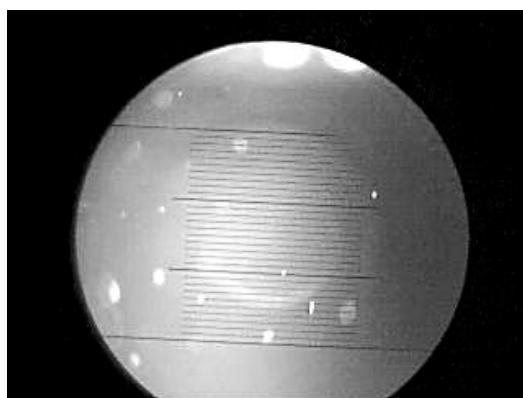


Рис. 6. Капли масла (белые точки) между обкладками конденсатора.  
Расстояние между делениями градуировочного стекла в поле окуляра 0,029 мм

1. Включите оптическую систему установки Милликена и проведите калибровку микрометра, используя градуировочное стекло.

2. Установите напряжение 300 В на установке Милликена. Впрысните капли масла в пространство наблюдения в установке с помощью резиновой груши, вследствие чего капли масла попадают в конденсатор через небольшое отверстие в верхней пластине. При этом из-за трения о воздух капли приобретают случайный заряд и

величине заряд. Настроив оптическую систему, наблюдайте движение капель масла. Для изменения направления движения капель меняйте с помощью переключателя направление электрического поля. Из видимых капель выделите ту, которая движется строго вертикально и с небольшой скоростью. Так как размеры получающихся капель малы, можно считать с большой степенью точности, что наблюдаемое движение является установившимся (капля движется с постоянной скоростью).

3. С помощью секундомера определите время движения  $t_1$  выделенной капли вверх при прохождении определенного расстояния  $S_1$ , а также время движения  $t_2$  этой же капли вниз при прохождении определенного расстояния  $S_2$ . Пройденное каплей расстояние определяется как произведение цены деления микрометра (см. п.1 задания) на число пройденных делений шкалы. Занесите данные в таблицу 1. Повторите опыт с несколькими каплями (4...6 капель).

Таблица 1

$U, В$	Номер капли	$S_1, мм$	$t_1, с$	$S_2, мм$	$t_2, с$
300					
400					
500					

4. Повторите эксперимент для нескольких капель (4...6 капель) при напряжениях на установке Милликена 400 В и 500 В. Занесите данные в таблицу 1.

## 5. Обработка результатов

1. Используя данные таблицы 1, сделайте расчет скоростей падения  $v_1$  и подъема  $v_2$  капель.

2. Вычислите радиусы и заряды капель по формулам (8) и (9). Так как заряд капли есть целое число  $n$  элементарного заряда  $e$  (заряда электрона):

$$Q = ne \quad (10),$$

то из формулы (10) можно определить элементарный заряд. Заполните таблицу 2.

3. Проведите математическую обработку полученных результатов. Вычислите погрешность измеренного заряда.

Таблица 2

Номер капли	$v_1, \text{ м/с}$	$v_2, \text{ м/с}$	$Q, \text{ Кл}$	$r, \text{ м}$	$n$	$e, \text{ Кл}$
1						
2						
...						

4. Постройте график зависимости  $Q(r)$  (рис. 7).

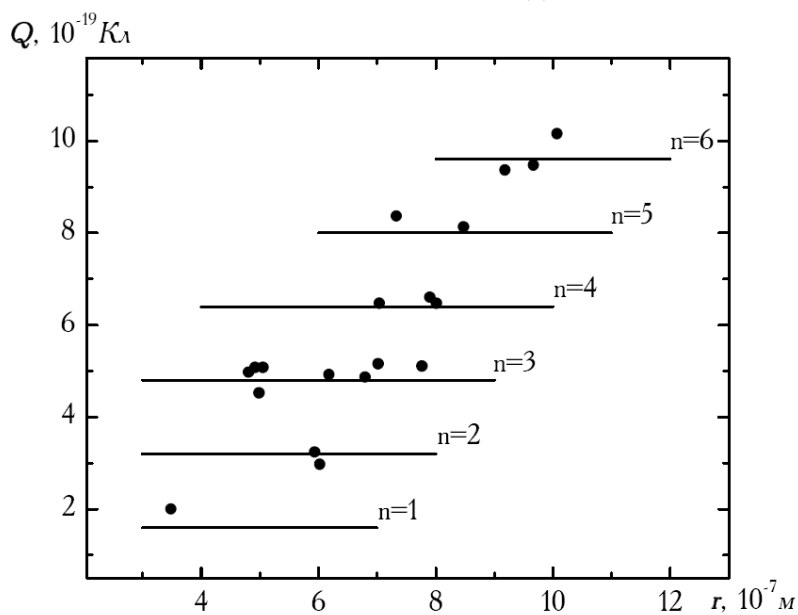


Рис. 7. Пример графического представления результатов эксперимента

6. Проведите анализ полученных результатов. Сравните полученный в опыте заряд электрона со справочным значением:  
 $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл.

## 6. Содержание отчета

Отчет оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с требованиями, предъявляемыми кафедрой ОТФ, в котором помимо стандартного титульного листа должны быть раскрыты следующие пункты:

- I. Цель работы.
- II. Краткое теоретическое содержание:
  1. Явление, изучаемое в работе.
  2. Определение основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
  3. Законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы, на основании которых получены расчётные формулы.
  4. Пояснения к физическим величинам.
- III. Электрическая схема.
- IV. Расчетные формулы.
- V. Формулы погрешностей косвенных измерений.
- VI. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
- VII. Пример вычисления (для одного опыта):
  1. Исходные данные.
  2. Вычисления.
  3. Окончательный результат.
- VIII. Графический материал:
  1. Аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить.
  2. На осях координат указать масштаб, физические величины и единицы измерения.
  3. На координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки.
  4. По результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию, аппроксими-

рующую функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

IX. Анализ полученного результата. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Стокса.
2. Дайте определение подвижности частицы.
3. Какие силы действуют на заряженную каплю масла в опыте Милликена?
4. Получите формулу (8).
5. Получите формулу (9).
6. Почему в установке Милликена используется масло, а не вода?
7. Почему капля должна быть маленькой? Каким должен быть нижний предел размеров капель?
8. Что такое напряженность, потенциал электрического поля, электроемкость? От чего зависит напряженность электрического поля, электроемкость конденсатора?

### 7. Рекомендательный библиографический список

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2009.
2. Иродов И.Е. Электromagnetизм. М.: Бином, 2006.
3. Калашиников Н.П. Основы физики. М.: Дрофа, 2004. Т. 1
4. Савельев И.В. Курс физики. Т. 2, 3. СПб.: Лань, 2009.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1-5, М.: Наука, 2009.
6. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2009.

### СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Теоретические основы лабораторной работы .....	7
3. Описание экспериментальной установки .....	10
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	12
5. Обработка результатов .....	13



6. Содержание отчета.....	15
7. Рекомендательный библиографический список.....	16