

## Лабораторная работа 3.12V (VirtualLab)

# Опыт Милликена

### Содержание

Цели и задачи лабораторной работы	2
Введение	2
Описание виртуальной установки	7
Порядок выполнения работы	8
Проведение измерений . . . . .	8
Обработка результатов измерений . . . . .	10
Список литературы	11
Приложение	12

## Цели работы

1. Исследование движения заряженных капель в электрическом и гравитационном полях.
2. Определение величины элементарного заряда.

## Задачи

1. Измерение скоростей движения капель масла при различных напряжениях и направлениях электрического поля.
2. Определение радиуса и заряда капель.

## Введение

Электрический заряд тела не может изменяться непрерывным образом, так как он состоит из дискретного набора элементарных зарядов — квантов электричества. Элементарным зарядом обладают такие частицы, как электроны, протоны и др., также называемые элементарными.

Самым прямым и наиболее доказательным способом определения величины элементарного заряда считается опыт Милликена. В 1910 г. Роберт Эндрюс Миллиken, профессор университета в Чикаго, поставил элегантный опыт по определению заряда электрона. Он доказал: этот заряд является элементарным, т.е. по существу доказал, что электрический заряд квантуется. В 1923 г. за эту работу Миллиken получил Нобелевскую премию.

Принципиальная схема эксперимента изображена на рис. 1. В пространство между горизонтально расположенными пластинами воздушного конденсатора впрыскивают из пульверизатора капли масла. При впрыскивании за счет трения о воздух на каплях возникает электрический заряд.

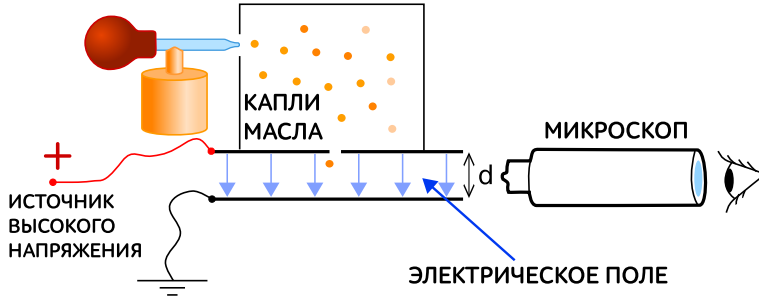


Рис. 1. Принципиальная схема опыта Милликена

Размеры распыляемых капель настолько малы, что наблюдать их движение возможно только в микроскоп. На каждую из капель действуют четыре силы: сила тяжести, сила вязкого трения, сила Архимеда и электрическая сила.

Сила тяжести определяется соотношением

$$\vec{F}_{mg} = m\vec{g} = \rho_o V \vec{g}, \quad (1)$$

где  $\vec{g}$  - ускорение свободного падения,  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$  - объем капли,  $r$  - радиус капли,  $\rho_o$  - плотность используемого масла.

Сила вязкого трения, действующая на каплю, движущуюся со скоростью  $\vec{v}$ , со стороны окружающего воздуха в соответствии с формулой Стокса может быть записана как

$$\vec{F}_v = -6\pi\eta r \vec{v}, \quad (2)$$

где  $\eta$  - вязкость воздуха. Отметим, что сила вязкого трения направлена противоположно вектору скорости капли  $\vec{v}$ .

Сила Архимеда

$$\vec{F}_A = -\rho V \vec{g}, \quad (3)$$

всегда ориентирована вертикально вверх и зависит от плотности воздуха  $\rho$ .

Электрическая сила

$$\vec{F}_E = q\vec{E}, \quad (4)$$

действующая на каплю с зарядом  $q$  со стороны электрического поля конденсатора, имеет направление которое зависит от знака заряда пластин конденсатора и знака заряда капли. Модуль электрической силы можно представить как  $F_E = qE = q\frac{U}{d}$ , где  $U$  - напряжение на конденсаторе;  $d$  - расстояние между пластинами.

При установившемся движении капля движется равномерно и сумма всех сил, приложенных к ней, равна нулю:

$$\vec{F}_{mg} + \vec{F}_v + \vec{F}_A + \vec{F}_E = 0, \quad (5)$$

Предположим, что капля движется вниз и в этом же направлении на нее действует электрическая сила  $F_E$ . Тогда уравнение (5) в проекции на вертикальное направление будет иметь следующие знаки слагаемых:

$$F_{mg} - F_v - F_A + F_E = 0, \quad (6)$$

Подставив в равенство (6) модули всех сил, определенных выше, найдем скорость с которой опускается капля:

$$v_1 = \frac{1}{6\pi\eta r} \left( qE + \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_o - \rho) g \right). \quad (7)$$

При изменении направления вектора напряженности электрического поля и движении капли вверх со скоростью  $v_2$  из уравнения (5) получаем соотношение вида

$$F_{mg} + F_v - F_A - F_E = 0, \quad (8)$$

из которого находим скорость  $v_2$

$$v_2 = \frac{1}{6\pi\eta r} \left( qE - \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_o - \rho) g \right). \quad (9)$$

Вычитая (7) и (9) друг из друга, легко получить выражение для радиуса капли  $r$ :

$$r = C_r \sqrt{v_1 - v_2}, \quad (10)$$

где значение константы определяется  $C_r$  параметрами экспериментальной установки:

$$C_r = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta}{(\rho_o - \rho)g}}. \quad (11)$$

Складывая (7) и (9) друг с другом и используя уже известное соотношение (10) для радиуса капли, можно записать формулу для заряда:

$$q = C_q \frac{(v_1 + v_2) \sqrt{v_1 - v_2}}{U}, \quad (12)$$

в котором константа  $C_q$  имеет значение

$$C_q = \frac{9}{2} \pi d \sqrt{\frac{\eta^3}{(\rho_o - \rho)g}}. \quad (13)$$

Получение значения элементарного заряда с точностью, достигнутой Р. Миллиkenом, в условиях проведения реального эксперимента является весьма непростой задачей.

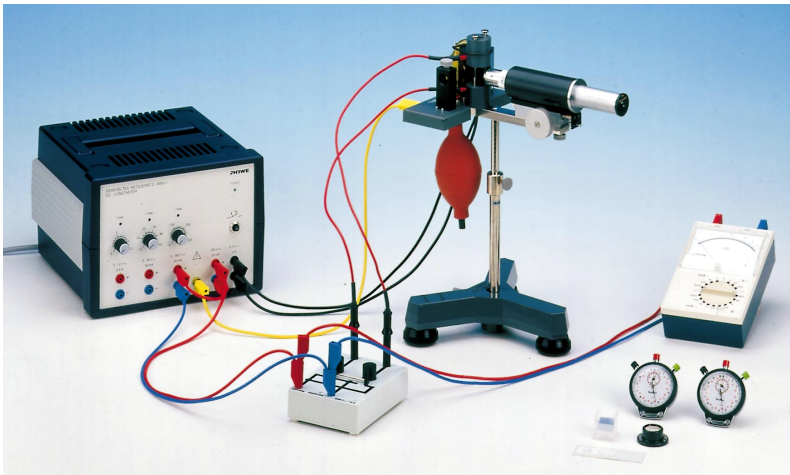


Рис. 2. Общий вид лабораторной установки

Несмотря на простоту теории и экспериментальной установки, сам эксперимент весьма тонкий и требует аккуратности. Необходимо надежно стабилизировать температуру и давление воздушной среды, в которой движется капля масла, а также исключить влияние конвективных потоков воздуха.

Требования к размеру и веществу капли весьма противоречивы. Во-первых, капля должна быть однородной и очень маленькой, иначе на ней может оказаться большой заряд, а отличить заряд, содержащий 1000 электронов, от заряда с 1001 электроном невозможно из-за погрешностей эксперимента. Следовательно, чем меньше капля, тем лучше.

Во-вторых, капля должна быть строго сферической, иначе не будет применима формула Стокса (2). Кроме того, капля должна сохранять массу, т.е. не должна испаряться. Из этих соображений были выбраны именно масляные капли.

Однако если капли были слишком маленькими, Милликен получал аномально завышенные значения элементарного заряда по сравнению с результатами других измерений. Он нашел объяснение этому эффекту. Формула Стокса получена для сплошной среды, а когда размеры капли становятся сравнимыми с длиной свободного пробега молекул газа, среду уже нельзя считать сплошной. Капля испытывает хаотичные столкновения с молекулами воздуха, и ее броуновское движение искажает результат. Милликен внес поправки в формулу Стокса, изменил методику измерений и получил очень хороший результат.

В виртуальной лабораторной работе непосредственно измеряются время движения капли и путь, пройденный ею за это время. По формулам (10) и (12) вычисляются радиус и заряд капли, затем специальной обработкой результатов измерений вычисляется элементарный заряд.

## Описание виртуальной установки

В левой части экрана показано поле зрения микроскопа с линейной шкалой для определения длины пути, проходимого каплями. Цена деления шкалы (расстояние между ближайшими горизонтальными штрихами) равна  $\Delta_y = 5,33 \cdot 10^{-5}$  м. При нажатии кнопки «РАСПЫЛИТЬ» происходит впрыскивание мелких капель масла в поле зрения микроскопа. Перемещение капель в отсутствии внешнего электрического поля происходит в поле зрения микроскопа снизу вверх (так как изображение, как и настоящем микроскопе является перевернутым).

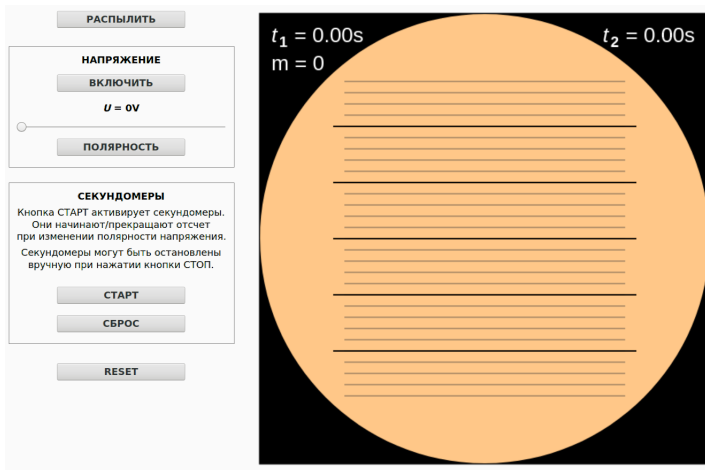


Рис. 3. Схема лабораторного стенда

### Параметры лабораторного стенда

1. Ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$
2. Плотность масла  $\rho_o = 875,3 \text{ кг/м}^3$
3. Плотность воздуха  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$
4. Вязкость воздуха  $\eta = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Н·с/м}^2$
5. Расстояние между обкладками конденсатора  $d = 6 \text{ мм}$

## Порядок выполнения работы

### Проведение измерений

1. Запустите виртуальную лабораторную установку. Доступ к ней откроется после выполнения теста.
2. Установите значение напряжения на конденсаторе в пределах  $U = 100 \div 300 \text{ В}$ . Выберите для него отрицательную полярность. Подайте установленное значение напряжения на пластины конденсатора, нажав кнопку «ВКЛЮЧИТЬ».
3. Несколько раз нажав на клавишу «РАСПЫЛИТЬ» произведите впрыскивание капель масла в поле зрения микроскопа. Подождите пока они не разместятся до середины шкалы – так с ними будет удобнее работать. Разные частицы могут двигаться с разной скоростью, это связано с тем, что заряды и размеры капель неодинаковы.
4. Измените полярность напряжения и выберите из капель ту, которая изменила направление своего движения на противоположное<sup>1</sup>. Скорость движения капель можно менять регулировкой напряжения. Используйте эту возможность для того, чтобы сделать скорость движения выбранной капли минимальной.
5. Переключая полярность напряжения, убедитесь в том что вы можете управлять направлением движения выбранной капли.
6. Активируйте секундомеры, нажав на кнопку «СТАРТ». Первый из них начнет отсчет времени после переключения полярности напряжения.
7. При прохождении капель при движении сверху вниз самой нижней риски шкалы, измените полярность на отрицательную.

---

<sup>1</sup>Имейте в виду, что значительная часть капель остается незаряженной. В этом случае изменение направления поля не меняет направления движения капель. Этот же эффект может наблюдаться, если капли – крупные. Наберитесь терпения и прежде, чем переходить к измерениям, потренируйтесь в отборе маленьких капель, меняющих направление движения при изменении направления поля.



После этого капля станет двигаться вверх, а первый секундомер начнет измерять время ее движения.

8. При достижении капель самой верхней риски шкалы измените полярность на положительную. При этом капля станет двигаться вниз, и второй секундомер начнет отсчет времени.

9. При опускании капли до первоначальной (нижней) риски остановите счет времени, нажав кнопку «СТОП»<sup>2</sup>. Внесите значения напряжения  $U$ , времен  $t_1$  и  $t_2$  в рабочую таблицу протокола измерений (см. Приложение). Обнулите показания секундомеров, нажав кнопку «СБРОС».

10. Повторите данный цикл измерений для не менее чем для 20 различных капель.

---

<sup>2</sup>Можно не нажимать «СТОП» когда частица долетает до первоначальной риски, а снова поменять полярность, проделав еще один цикл движения для этой частицы. На экране в переменной  $m$  записывается число изменений полярности. Таким образом, чтобы найти среднее время движения капли между рисками, нужно разделить каждое из значений времени на  $\frac{m}{2}$

## Обработка результатов измерений

1. Для каждой строки таблицы протокола измерений найдите значения скоростей при движении капли в двух направлениях  $v_1$  и  $v_2$ , разделив расстояние, проходимое каплей на время ее перемещения.
2. По данным приведенным в разделе «Описание виртуальной установки» найдите значения параметров  $C_r$  и  $C_q$  по формулам (11) и (13), соответственно.
3. С помощью значений найденных констант вычислите радиусы и заряды всех капель.
4. Представьте полученные результаты в наглядном виде, изобразив значения радиусов и зарядов капель в виде набора точек на графике  $\{r_i, q_i\}$ . Примерный вид требуемого графика представлен на иллюстрации ниже.

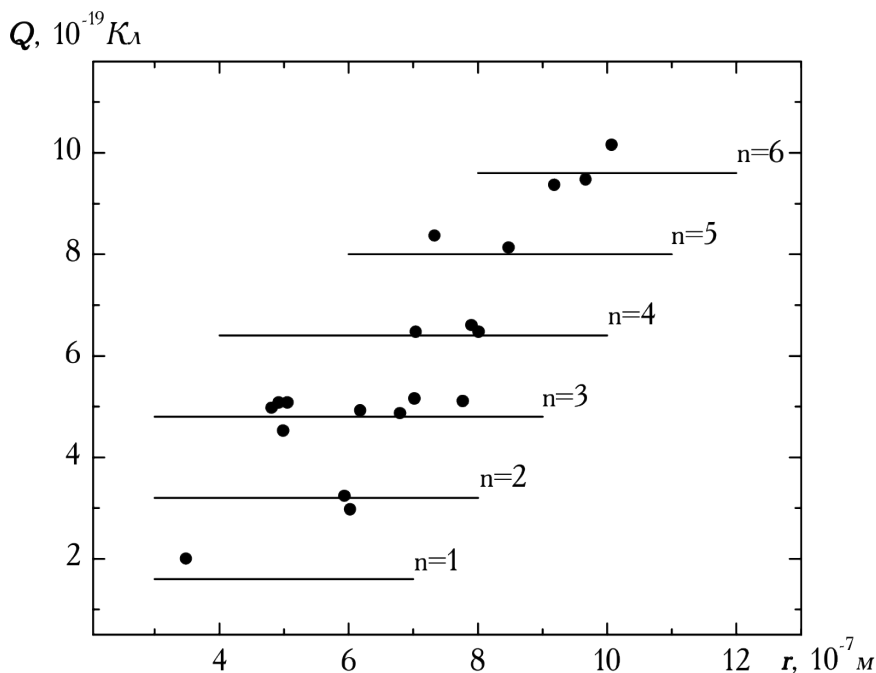


Рис. 4. Графическое представление результатов эксперимента

5. Графический формат представления данных позволяет разделить полученные значения зарядов капель на группы, каждой из которых соответствует определенное целое число  $n$  – количество элементарных зарядов. Определив эти значения, оцените величину элементарного заряда для каждой строки таблицы с данными как  $e_i = \frac{q_i}{n}$ .

6. Найдите среднее значение оценки элементарного заряда и его среднеквадратичное отклонение ( $N = 20$ ):

$$\langle e \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (e_i - \langle e \rangle)^2}$$

7. В отчете по лабораторной работе приведите интервал полученных значений радиусов капель и интервал значений их зарядов. Сравните полученное оценочное значение элементарного заряда с табличным значением заряда электрона:  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

## Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. М.: Кнорус, 2009. С. 249-252.
2. Шпольский Э.В. Атомная физика. Т. 1. М.: Лань, 2010.

## Приложение

**Таблица 1:** Результаты прямых измерений и их обработка

№	$U, B$	$t_1, c$	$t_2, c$	$v_1$	$v_2$	$r$	$q, 10^{-19} Кл$	$n$	$e, 10^{-19} Кл$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									