

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА СПОСОБОМ МИЛЛИКЕНА.

Цель работы:

Определение величины элементарного заряда, заряда электрона.

Решаемые задачи:

1. Повторение опытов Милликена по определению величины заряда электрона.
2. Освоение методики измерений и обработки экспериментальных данных.

Теория.

Милликен экспериментально установил (1910 г.), что электрический заряд размещается на небольших по размеру телах в дискретных количествах. Изучая движение заряженных масляных капель в вертикальном электрическом поле плоского конденсатора, он установил, что заряд q появляется в количестве, кратном элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл:

$$q = n \cdot e. \quad (1)$$

На каплю масла радиуса r_0 , падающую свободно в воздухе под действием силы тяжести (рис. 1а), действует сила сопротивления среды (вязкого трения), направленная вверх и равная по формуле Стокса:

$$\mathbf{F}_1 = -6\pi\eta r_0 \mathbf{v}_1 = 6\pi\eta r_0 v_1 \mathbf{k}, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости воздуха, \mathbf{v}_1 и v_1 – вектор и модуль скорости капли, \mathbf{k} – орт вертикальной оси координат, направленной вверх. Если капля поднимается со скоростью v_2 (рис. 1б), то сила трения Стокса направлена вниз и равна:

$$\mathbf{F}_2 = -6\pi\eta r_0 \mathbf{v}_2 = -6\pi\eta r_0 v_2 \mathbf{k}. \quad (3)$$

При равномерном движении капли вниз сила тяжести $\mathbf{F}_{\text{тяж}}$ уравнивается силой вязкого трения \mathbf{F}_1 (рис. 1а), а при равномерном движении капли вверх сумма сил тяжести $\mathbf{F}_{\text{тяж}}$ и вязкого трения \mathbf{F}_2 противодействует кулоновской силе $\mathbf{F} = q_0\mathbf{E}$ (рис. 1б), q_0 – заряд капли. Таким образом, выполняются равенства:

$$-\mathbf{F}_{\text{тяж}} = \mathbf{F}_1 \text{ и } \mathbf{F} = -\mathbf{F}_{\text{тяж}} - \mathbf{F}_2, \quad (4)$$

где \mathbf{E} – напряженность электростатического поля.

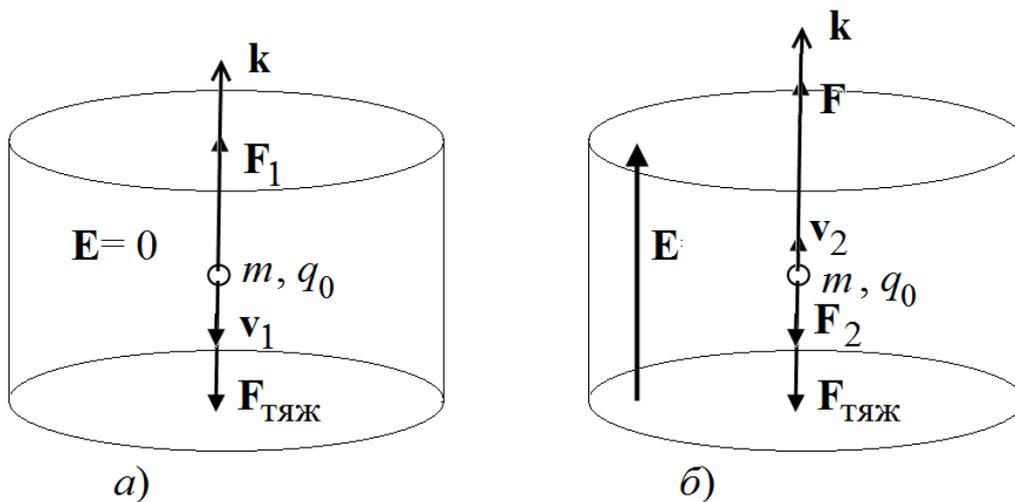


Рис. 1

Из формул (4) следует равенство сил, записанное в векторной форме:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) значение силы

$$\mathbf{F} = q_0\mathbf{E} = q_0E \mathbf{k} = (q_0U/d) \mathbf{k}, \quad (6)$$

где U – разность потенциалов (напряжение) и d – расстояние между обкладками конденсатора, и силы \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 из формул (2) и (3), получим выражение:

$$q_0U/d = 6\pi\eta r_0 (v_1 + v_2), \quad (7)$$

из которого вытекает расчетная формула величины заряда капли q_0 :

$$q_0 = 6\pi\eta r_0 (v_1 + v_2) / U. \quad (8)$$

Чтобы вычислить q_0 , кроме условно известных величин скоростей v_1 и v_2 , коэффициента вязкости среды η и напряжения U , требуется знание еще радиуса капли r_0 . При свободном падении капли в воздухе со скоростью v_1 его можно определить из равенства модулей силы тяжести $F_{\text{тяж}}$ и силы трения Стокса F_1 :

$$F_{\text{тяж}} = (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{в}})Vg = \Delta\rho Vg \text{ и } F_1 = 6\pi\eta r_0 v_1, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{м}}$ и $\rho_{\text{в}}$ – плотности масла и воздуха, $\Delta\rho$ – их разность. Из баланса сил $F_{\text{тяж}}$ и F_1 , следует равенство:

$$4\pi r_0^3 \Delta\rho g / 3 = 6\pi\eta r_0 v_1. \quad (10)$$

И, наконец,

$$r_0 = \sqrt{9\eta v_1 / 2\Delta\rho g}. \quad (11)$$

При более точном определении заряда q , следует принять во внимание, что сила трения Стокса нуждается в поправке на малую величину радиусов r_0 , по порядку величины сравнимых со средней длиной свободного пробега молекул воздуха. Учет этой поправки сводится к введению давления воздуха p в формулы силы трения F , радиуса капли r и заряда q , а именно:

$$F = 6\pi\eta r v / (1 + b/rp), \quad (12)$$

$$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{b^2}{4p^2}} - \frac{b}{2p} \quad (13)$$

и

$$q = \frac{q_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{b}{pr}\right)^3}}, \quad (14)$$

где константа b равна: $b = 8 \text{ мкм} \cdot \text{кПа}$.

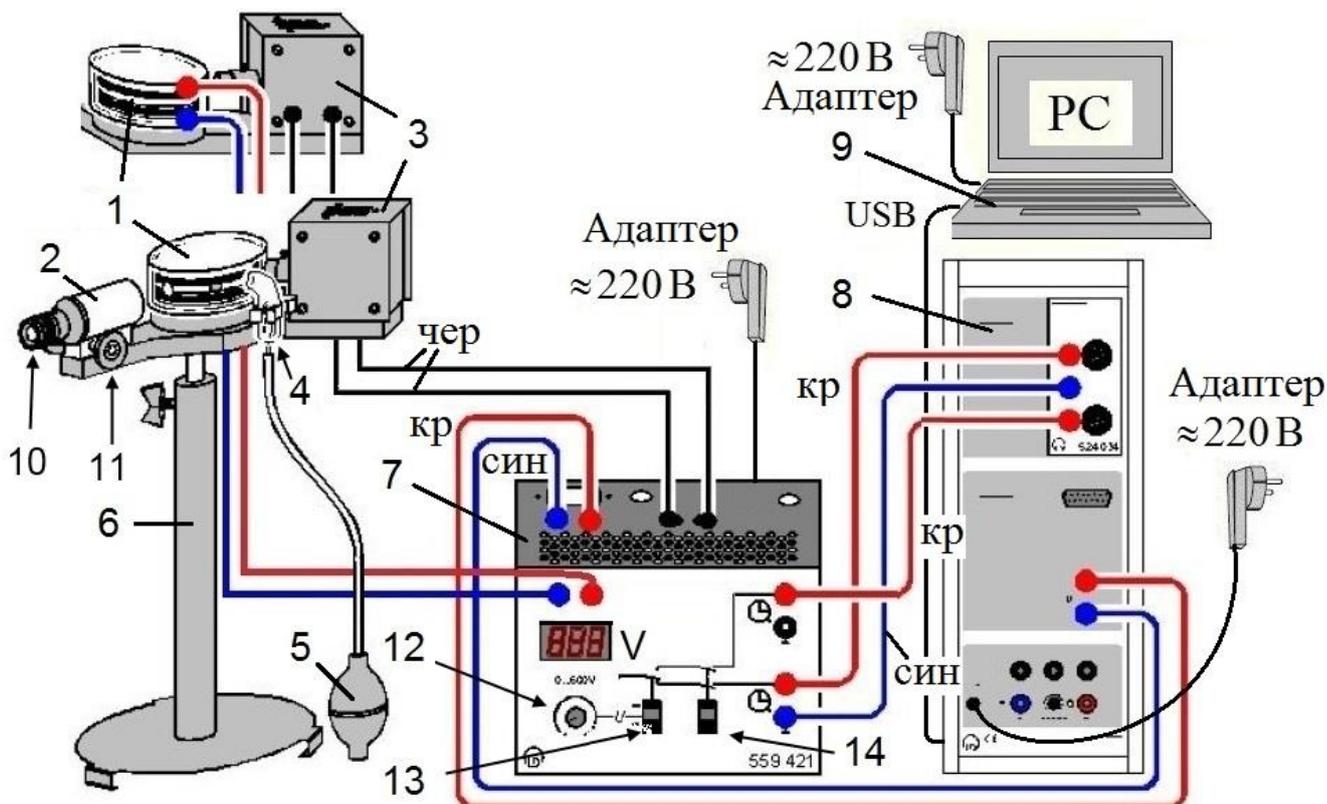


Рис. 2. Функциональная схема измерительной установки.

Обозначения: 1 - камера Милликена, 2 - измерительный микроскоп, 3 - осветитель, 4 - пульверизатор, 5 - помпа, 6 - подставка, 7 – пульт управления (ПУ), 8 - измерительный прибор «Sensor-CASSY», 9 - компьютер (PC) с встроенной программой CASSY Lab 2, 10 - окуляр микроскопа, 11 - винт настройки микроскопа на резкость изображения, 12 - ручка плавной регулировки напряжения на конденсаторе, 13 - тумблер – выключатель напряжения конденсатора, 14 - тумблер – переключатель таймера.

Описание методики эксперимента

1. Способ парящей капли (Floating method).

В этой (первой) версии эксперимента напряжение U подбирается так, чтобы выбранная капля масла находилась вначале в подвешенном состоянии, т.е. скорость подъема капли равна нулю: $v_2 = 0$. После выключения напряжения, приложенного на конденсатор, измеряется

скорость свободного падения v_1 . Вследствие того, что $v_2 = 0$, расчетная формула (8) несколько упрощается. Вместе с тем, такое состояние труднодоступно, в принципе. Поэтому этот метод приводит к большим инструментальным ошибкам и широкому спектру распределения результатов отдельных измерений.

1. Способ движущейся капли (Falling/rising method).

В этом (втором) способе проведения эксперимента измеряются обе скорости v_1 и v_2 и напряжение U , причем точно подгонять значение напряжения U не требуется. Поэтому способ движущейся капли является более точным.

Подготовка измерительной установки к работе.

1. Проверить соответствие монтажа схеме установки (рис. 2).
2. Ручку 12 пульта управления (регулировка напряжения на конденсаторе камеры Милликена) установить в крайнее левое положение ($U = 0$).
3. Тумблер 13 выключателя напряжения конденсатора установить в положение выключено «Off».
4. Подать сетевое напряжение ~ 220 В на пульт управления 7, прибор «Sensor-CASSY» 8 и компьютер "PC" 9.
5. Однократным сжатием помпы 5 сделать впрыск порции масла в камеру Милликена.
6. Настроить измерительный микроскоп 2 на наблюдение масляных капель:
 - a) поворотом окуляра 10 добиться резкого изображения координатной сетки – шкалы микроскопа,
 - b) поворотом винта 11 получить резкое изображение светлых точек – пылинок и пузырьков на сером фоне камеры Милликена и
 - c) если это необходимо, то отрегулировать положение тубуса осветителя 3 для получения более яркой подсветки объектов наблюдения.
7. С помощью микроскопа сделать пробные наблюдения капель. Эти капли будут медленно перемещаться вверх. Принимая во внимание, что в микроскопе изображение получается перевернутым, действительное движение капель происходит вниз.

Измерения.

Упражнение 1. Способ парящей капли (Floating method).

1. Выполнить все указания раздела: Подготовка измерительной установки к работе.
2. Включить компьютер 9, загрузить программу CASSY Lab 2, открыть файл "D:\Эксперименты\Р6124.labx", закрыть окно "CASSYs".
3. Удалить результаты измерений, ранее выполненные другими студентами. Для этого в меню "Measurement" (Измерение) активировать опцию "Delete current measurement series" (Удалить текущую серию измерений).
4. Сохранить файл со своим названием на внешнем носителе памяти (в дальнейшем работать только с ним).
5. Подать напряжение U на камеру Милликена 1 (тумблер 13 блока управления 7 перевести в положение "On").
6. Установить тумблер таймера 14 в положение «Off» (выключить таймер).
7. Установить ручкой потенциометра 12 напряжение 500 В.
8. При помощи помпы 5 впрыснуть порцию масла в камеру 1.
9. Выбрать 1 каплю в нижней части экрана для наблюдения (ниже отметки 0 на 10 – 20 делений) и, медленно поворачивая ручку 12 пульта управления, добиться подвешенного состояния выбранной капли (капля покоится).
10. Выключить тумблером 12 напряжение U на конденсаторе. Капля начнет опускаться (подниматься вверх по экрану!).
11. Записать начальную вертикальную координату выбранной для наблюдения капли и включить измерение времени падения t_1 : тумблер 14 перевести в положение "On".
12. Дать экспериментальной капле сместиться на 20 делений шкалы, то есть опуститься вниз в камере Милликена на 1 мм, и быстро выключить таймер (тумблер 14 перевести в положение «Off»).
13. Подать снова напряжение на конденсатор (включить тумблер 13).
14. Ввести измеренные значения времени падения t_1 и напряжения U в таблицу экспериментальных данных: однократно нажать клавишу «F9» на клавиатуре РС.
15. На гистограмме вашего файла автоматически отобразится величина заряда q .
16. Повторить действия 5–15 для других капель (20-30 измерений).

17. Ручку 12 пульта управления повернуть в крайнее левое положение. Тумблеры 13 и 14 пульта управления установить в положение «Off».
18. Выключить установку.

Упражнение 2. Способ движущейся капли (Falling/rising method).

1. Выполнить все указания раздела: Подготовка измерительной установки к работе.
2. Включить компьютер 9, запустить программу CASSY Lab 2, открыть файл "D:\Эксперименты\R6124.labx", закрыть окно "CASSYs".
3. Удалить результаты измерений, ранее выполненные другими студентами. Для этого в меню "Measurement" (Измерение) активировать опцию "Delete current measurement series" (Удалить текущую серию измерений).
4. Сохранить файл под своим названием на внешнем носителе памяти (в дальнейшем работать только в нем).
5. Подать напряжение U на камеру Милликена 1 (тумблер 13 блока управления 7 перевести в положение "On").
6. Установить тумблер таймера 14 в положение «Off» (выключить таймер).
7. Установить ручкой потенциометра 12 напряжение 500 В.
8. Выбрать 1 каплю в нижней части экрана для наблюдения (ниже отметки 0 на 10 – 20 делений). Далее, медленно изменяя напряжение на конденсаторе, т.е. поворачивая ручку 12 пульта 7, добиться такого состояния выбранной капли, когда она опускается со скоростью 1 – 2 деления шкалы микроскопа в секунду (на самом деле, эта капля поднимается).
9. Выключить тумблером 12 напряжение на конденсаторе камеры 1. Капля начнет подниматься вверх по экрану (в действительности – опускаться).
10. Запомнить начальную координату выбранной для наблюдения капли и включить измерение времени t_1 тумблером 14.
11. Дать экспериментальной капле подняться на 20 делений шкалы, то есть реально упасть на 1 мм с начальной высоты.
12. Без промедления подать снова напряжение на конденсатор (включить тумблер 13). Экспериментальная капля начнет обратное движение, то есть подниматься (это действительное направление

движения). Таймер автоматически начнет отсчет времени подъема капли t_2 .

13. Как только капля переместится на 20 делений шкалы (вернется в свое исходное положение) выключить таймер тумблером 14.
14. Ввести измеренные значения времени падения t_1 , времени подъема t_2 и напряжения U в таблицу экспериментальных данных клавишей «F9» клавиатуры компьютера РС.
15. Компьютер автоматически выдаст значение заряда q на гистограмме вашего файла.
16. Повторить действия 5 – 15 для других капель (минимум 30 измерений).
17. Ручку 12 пульта управления повернуть в крайнее левое положение. Тумблеры 13 и 14 пульта управления установить в нижнее положение.
18. Выключить установку.

Контрольные вопросы.

1. Электризация тел. Элементарный заряд. Носители заряда. Закон сохранения заряда. Взаимодействие зарядов. Закон Кулона.
2. Электрическое поле и его характеристики.
3. Действие электрического и магнитного полей на точечный заряд.
4. Экспериментальные методы определения величины элементарного заряда (Милликена, магнетрона).
5. Вывод рабочей формулы.
6. Объяснение полученных результатов.