

Міністерство освіти та науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
Кафедра фізики

Цветкова О. В.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНУ МЕТОДОМ МІЛЛІКЕНА

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи № 39
по курсу «Фізика»
для студентів всіх спеціальностей
всіх форм навчання

Маріуполь
2022

УДК 538.915

Визначення заряду електрона в експерименті Міллікена [Електронний ресурс]: методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи № 39 за курсом «Фізика» для студентів усіх спеціальностей усіх форм навчання/уклад. О. В. Цветкова, В. Нікітін – Маріуполь: ПДТУ, 2022. – 13 с.

Містять основні теоретичні положення щодо способу безпосереднього визначення елементарного заряду – заряду електрона, а також вказівки щодо проведення віртуального експерименту, який відтворює дослідження Міллікена.

Укладач О. В. Цветкова, канд. фіз.-мат. наук, доцент
В. Нікітін, студент

Рецензент В. Г. Єфременко, д-р техн. наук, проф.

Затверджено
на засіданні кафедри фізики,
протокол № 10 від 15 травня 2022 р.

Затверджено
на засіданні методичної комісії
факультету інформаційних технологій,
протокол № 7 від 30 травня 2022 р.

© ДВНЗ «ПДТУ», 2022

© О. В. Цветкова, 2022

© В. НІКІТИН, 2022

ВСТУП

Вивчення теми "Електрика" починається з вивчення фундаментального закону – закону збереження заряду. Він був вперше експериментально підтверджений в 1843 році англійським вченим Майклом Фарадеєм і вважається на даний час одним із фундаментальних законів збереження у фізиці (подібно до законів збереження імпульсу та енергії). Все більш чутливі експериментальні перевірки закону збереження заряду, що тривають і досі, доки не виявили відхилень від цього закону. Думка про дискретність електричного заряду вперше була висловлена Б. Франкліном в 1752 р. Експериментально дискретність зарядів була обґрунтована законами електролізу, відкритими М.Фарадеєм в 1834 р. Числове значення елементарного заряду було теоретично обчислено на підставі законів електролізу з використанням числа Авогадро. Прямі експериментальні вимірювання елементарного заряду були виконані Р. Міллікеном в класичних дослідах у 1908 - 1916 рр. Ці досліди дали також незаперечний доказ атомізму електрики.

Згідно з основними уявленнями електронної теорії, заряд будь-якого тіла змінюється в результаті зміни в ньому кількості електронів (або, в деяких явищах, іонів, величина заряду яких кратна заряду електрона). Тому заряд будь-якого тіла повинен змінюватися стрибкоподібно і такими порціями, які містять ціле число зарядів електрона.

Встановивши на досліді дискретний характер зміни електричного заряду, Р. Міллікен зміг отримати підтвердження існування електронів і визначити величину заряду одного електрона (елементарний заряд), використовуючи метод масляних крапель. В основу методу покладено вивчення руху заряджених крапельок масла в однорідному електричному полі відомої напруженості E .

Схема установки

Схема однієї з установок Міллікена приведена на рис. 2.1.

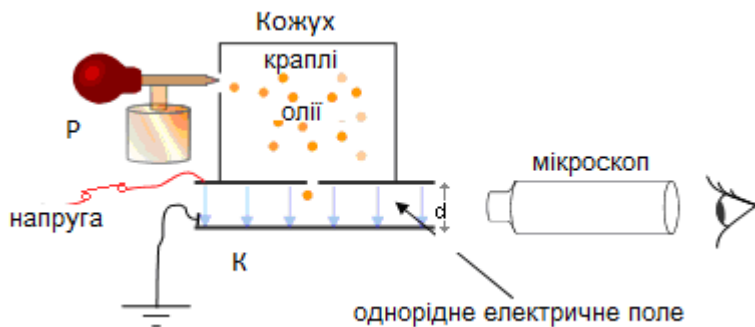


Рисунок – 2.1 Схема установки

Міллікен вимірював електричний заряд окремих маленьких крапель сферичної форми, які формувалися розпилювачем Р і набували електричний заряд електризацією тертям об стінки розпилювача. Через малий отвір у верхній пластині плоского конденсатора К вони потрапляли в простір між пластинами. За рухом краплі спостерігали в мікроскоп.

З метою запобігання крапельок від конвекційних потоків повітря, конденсатор був укладений в захисний кожух, температура і тиск в якому підтримувалися постійними. При виконанні дослідів було потрібно дотримуватися таких умов:

1. Краплі повинні бути мікроскопічних розмірів, щоб:

електростатична сила, що діє на заряджену краплю, при включеному електричному полі перевищувала силу тяжіння;

заряд краплі, а також його зміни при опроміненні (використанні іонізатора) були рівні досить малому числу елементарних зарядів. Це дозволяє легше встановити кратність заряду краплі елементарному заряду;

2. Густина краплі повинна бути більша за густину середовища, в якій вона рухається (повітря);

3. Маса краплі не повинна змінюватися протягом усього експерименту. Для цього масло, з якого складається крапля, не повинно випаровуватися (масло випаровується значно повільніше води).

Якщо пластини конденсатора не були заряджені (напруженість електричного поля $E = 0$), то крапля повільно падала, рухаючись від верхньої пластини до нижньої. Як тільки пластини конденсатора заряджалися, в русі краплі відбувалися зміни: в разі негативного заряду на краплі і позитивного на верхній пластині конденсатора падіння краплі сповільнювалося, і в певний момент часу вона змінювала напрямок руху на протилежне - починала підніматися до верхньої пластини.

Рівняння руху краплі

Знаючи швидкість падіння краплі за відсутності електростатичного поля (заряд її не грав ролі) і швидкість падіння краплі в заданому і відомому електростатичному полі, Міллікен зміг обчислити заряд краплі. Для визначення заряду спочатку необхідно розглянути рух краплі у відсутності електростатичного поля (пластини конденсатора не заряджені, напруженість поля $E = 0$).

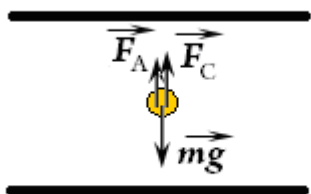


Рисунок 2.2 – Сили, що діють на краплю при відсутності електростатичного поля

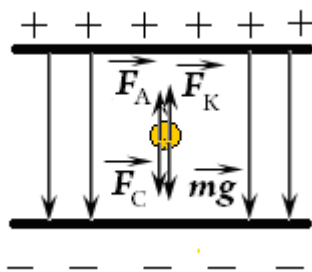


Рисунок 2.3 – Сили, що діють на краплю при наявності електростатичного поля

У цьому випадку на краплю діють три сили (рис. 2.2):

сила тяжіння mg , де m – маса краплі, g – прискорення вільного падіння;

архімедова сила $F_A = \rho_2 g V$, де ρ_2 – щільність повітря, V – об'єм краплі,

сила в'язкого опору $F_c = k v$, де k – деякий коефіцієнт пропорційності (залежить від в'язкості повітря, розмірів і форми краплі), v – швидкість краплі.

Запишемо для випадку, відповідного рис. 2.2, другий закон Ньютона в проекції на вісь, яка збігається з напрямком руху:

$$m g - \rho_2 g V - k v = m a \quad (2.1)$$

де a – прискорення, з яким падає крапля.

Через в'язкий опір крапля майже відразу після початку руху або зміни умов руху набуває постійну (сталу) швидкість і рухається рівномірно. В силу цього $a = 0$, і з (2.1) можна знайти швидкість руху краплі. Позначимо модуль сталої швидкості під час відсутності електростатичного поля v_l . Тоді

$$m g = \rho_2 g V + k v_l \quad (2.2)$$

Якщо замкнути електричне коло конденсатора (рис. 2.1), то він зарядиться і в ньому створиться електростатичне поле напруженістю E . При цьому на заряд q буде діяти додаткова до перерахованих сила qE , яка спрямована вгору за умови, що заряд негативний, а верхня пластина конденсатора має позитивний потенціал (рис. 2.3).

Як і у випадку вільного падіння краплі розглянемо сталий режим руху. Закон Ньютона в проекції на напрямок руху і з урахуванням, що $a = 0$, набуде вигляду:

$$m g + k v_2 = \rho_2 g V + q E, \quad (2.3)$$

де v_2 – стала швидкість масляної краплі в електростатичному полі конденсатора.

Вирішуючи спільно рівняння (2.2) і (2.3) отримаємо

$$q = \frac{k}{E} (v_1 + v_2) \quad (2.4)$$

З рівняння (2.4) випливає думка про те, що вимірюючи швидкості v_1 і v_2 за відсутності електростатичного поля і при його наявності відповідно, можна визначити заряд краплі, якщо відомий коефіцієнт k . Якщо вважати, що крапля масла має сферичну форму, то можна скористатися формулою Стокса, яка виконується для кулі, що рухається в газі, за умови, що радіус кулі в багато разів більше довжини вільного пробігу молекул газу. Під час експерименту краплі були настільки малі, що ця умова не виконувалася, і Міллікен вводив в розрахунки необхідні поправки. Крім того, необхідно було враховувати, що при значному зменшенні розмірів краплі, коли її радіус стає порівняним з товщиною шару молекул повітря, адсорбованого на поверхні краплі, ефективна густина краплі може істотно відрізнятись від густини її речовини.

В результаті було прийнято значення сили опору

$$F_c = 6 \pi \eta r v, \quad (2.5)$$

де η – коефіцієнт в'язкості повітря, r – радіус краплі.

Здавалося б, для знаходження k досить виміряти радіус краплі (в'язкість повітря відома з інших експериментів). Однак прямий вимір цього радіусу за допомогою мікроскопа неможливий: r має порядок величини $10^{-4} - 10^{-6}$ см, що можна порівняти з довжиною світлової хвилі. Тому мікроскоп дає лише дифракційне зображення краплі, не дозволяючи виміряти її справжніх розмірів.

Відомості про радіус краплі можна отримати з експериментальних даних при її русі під час відсутності електростатичного поля. З рівняння (2.2)

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_1}{2(\rho_m - \rho_e)g}} \quad (2.6)$$

Знаючи v_1 і враховуючи, що $k = 6\pi\eta r$ визначимо заряд

$$q = \frac{18\pi\eta}{E} \sqrt{\frac{\eta v_1}{2(\rho_m - \rho_e)g}} (v_1 + v_2) \quad (2.7)$$

В експерименті вимірюється значення напруги U на пластинах конденсатора, тоді напруженість однорідного поля конденсатора

$$E = \frac{U}{l}, \quad \text{де } l - \text{відстань між пластинами. Швидкість}$$

рівномірного руху $v = \frac{S}{t}$. Врахувавши дані зауваження, отримаємо робочу формулу визначення заряду краплі:

$$q = \frac{18\pi\eta l S}{U} \sqrt{\frac{\eta S}{2(\rho_m - \rho_e)g t_1}} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.8)$$

У своїх дослідах Міллікен змінював заряд краплі, підносячи шматок радіо до конденсатору. При цьому випромінювання радіо іонізувало повітря в камері (рис. 2.1), в результаті чого крапля могла захопити додатково позитивний або негативний заряд. Якщо до цього крапля була заряджена негативно, то зрозуміло, що з більшою ймовірністю вона приєднає до себе позитивні іони. З іншого боку, не виключено приєднання негативних іонів. В тому і в іншому випадках

зміниться заряд краплі і, отже, стрибкоподібно швидкість її руху v_2 .

Порівнюючи величини заряду однієї і тієї ж краплі, можна переконатися, що величина зміни заряду і сам заряд краплі є кратними однієї і тієї ж величині e (елементарному заряду). У своїх численних дослідках Міллікен отримував різні значення зарядів, але завжди вони були кратні величині $e = 1,7 \cdot 10^{-19}$ Кл, тобто $q = ne$, де n – ціле число. Звідси Міллікен уклав, що величина e представляє найменшу можливу в природі кількість електрики, тобто "порцію або атом" електрики.

Сучасне значення мінімальної порції електрики $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Ця величина і є елементарний електричний заряд, носіями якого є електрон, що має негативний заряд $-e$ і протон, який має заряд e .

3 ВІРТУАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Спостереження за рухом однієї й тієї краплі, тобто за її переміщенням вниз (без електричного поля) і вгору (за наявності електричного поля) у кожному досліді Міллікен повторював багаторазово, своєчасно включаючи і вимикаючи електричне поле. Точність виміру заряду краплі істотно залежить від точності виміру швидкості її руху.

У комп'ютерному експерименті імітуються всі ті дії, які робив Міллікен у своїх класичних дослідках. На вибір відповідного значення електричного поля та проведення вимірювань швидкості краплі у вас буде приблизно стільки ж часу, скільки мав Міллікен. Це допоможе вам відчувати атмосферу великого фізичного експерименту та краще запам'ятати його основні особливості.

На рис.3.1 показано сучасну експериментальну установку для спостереження за краплею масла, що рухається в електричному полі, і її прив'язка до віртуального експерименту.

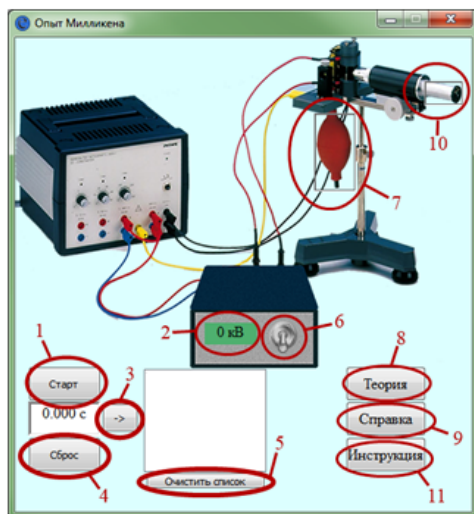


Рисунок 3.1 – Фрагмент основного вікна програми

1. Кнопка запису / зупинки відліку часу (кнопка S на клавіатурі).
2. Дисплей вольтметра. Показує, яка напруга на конденсаторі.
3. Кнопка додавання поточного значення часу в список.
4. Кнопка скидання секундоміра (кнопка R на клавіатурі).
5. Кнопка очищення списку часу.
6. Кнопка перемикавання напруги (кнопка «пробіл» на клавіатурі).
7. "Груша", при натисканні на яку з'являються краплі.
8. Кнопка, при натисканні на яку відкривається вікно з теорією.
9. Кнопка, при натисканні на яку відкривається вікно з довідкою за програмою.
10. Кнопка, яка розгортає і згортає вікно окуляра.

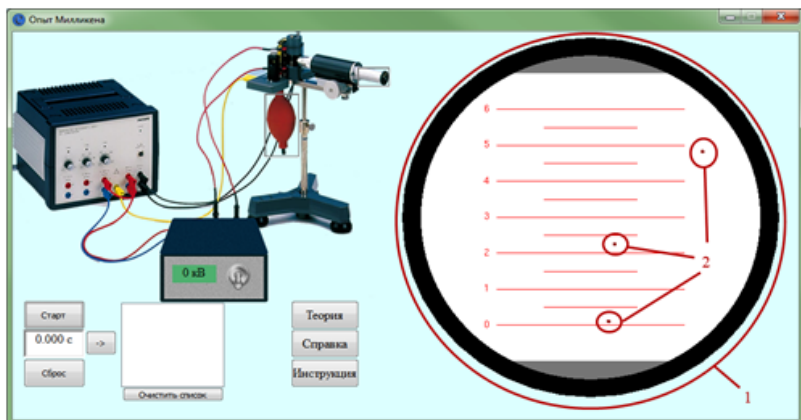


Рисунок 3.2 – Основне вікно в «розгорнутому» вигляді

1. «Окуляр», в який користувач спостерігає краплю масла.
2. Краплі.

4 ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Підготуйте установку до роботи: відкрийте вікно окуляра мікроскопа; на джерелі живлення напруги не повинно бути.

Секундомір управляється стандартними кнопками «Старт», «Стоп», «Скидання» і має вікно для фіксації результатів вимірювань. *Рекомендація:* під час вимірювань зафіксуйте курсор на полі управління секундоміром, тому що Вам доведеться стежити за рухом краплі, а не за положенням курсору. Управління секундоміром для зручності дубльоване на клавіатурі клавішами S (старт, стоп) і R (скидання).

Джерело живлення управляється кнопкою, але для зручності включення (виключення) дубльоване клавішею «пробіл» клавіатури комп'ютера.

1. Натисканням на грушу пульверизатора створіть краплі масла в камері установки. Врахуйте, що під дією сили тяжіння вони почнуть падати. Виберіть одну з крапель для спостереження і замірів. Поспостерігайте за її рухом, але

не дайте їй впасти на нижню пластину, тому що вона прилипне до неї і доведеться створювати нову краплю. Для цього включіть напругу на конденсаторі, і крапля почне рух вгору. Не дайте їй прилипнути до верхньої пластини – вчасно вимкніть напругу. Перш ніж почати вимірювання, потренуйтеся в управлінні рухом краплі.

- Визначтеся в величині пройденого краплею шляху: виберіть мітки на шкалі мікрометра, при проходженні яких Ви будете включати і вимикати секундомір. Не міняйте величину пройденого шляху. Ціна поділки шкали мікроскопа 1,25мм. *Рекомендується* вибрати шлях між 1-им і 5-м поділами – в цьому випадку Ви будете встигати з включенням (виключенням) напруги, а пройдений шлях буде 10мм.
- Виміряйте 5 разів час руху вниз, а потім 5 разів час руху вгору; переписіть дані зі списку в таблицю 1. **Не забувайте, що блок вимірювань повинен бути для однієї і тієї ж краплі.** Визначте середні значення t_1 і t_2 .
- Розрахуйте значення заряду краплі по формулі (2.8) підставляючи середні значення часу t_1 і t_2

$$q = \frac{18\pi\eta l S}{U} \sqrt{\frac{\eta S}{2(\rho_m - \rho_g) g t_1}} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)$$

- Створіть нові краплі і зробіть виміри і розрахунки по п.3 і 4 ще раз. Повторіть експеримент не менше 5 разів. **Зауваження:** вибирайте краплі, рух вгору у яких помітно по часу відрізняється один від одного. Цим Ви гарантуєте різний заряд крапель, що необхідно для подальших розрахунків.

Таблиця 1

$$\eta = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с}; \quad l = 2\text{см}; \quad S = \dots\dots; \quad U = 25,0\text{кВ}; \quad g = 9,8\text{м/с}^2$$

$$\rho_m = 900\text{кг/м}^3 \quad \rho_g = 1,2\text{кг/м}^3$$

Дослід		1	2	3	4	5	середнє	q_i
Крапля 1	t_1							
	t_2							
Крапля 2	t_1							
	t_2							
Крапля 3	t_1							
	t_2							
Крапля 4	t_1							
	t_2							
Крапля 5	t_1							
	t_2							

6. Проаналізуйте отримані результати; значення близькі в межах помилки усередніть. **Запишіть їх в таблицю 2 послідовно від більшого до меншого.** Віднімаючи від більших значень зарядів менші, знайдіть мінімальне значення різниці. Врахуйте, що значення різниці можуть вийти різними, але при цьому кратними деякому мінімальному значенню; якщо різниця не виходить за межі похибки експерименту візьміть середнє значення з цих зарядів. Ділячи на ціле число, доведіть їх до остаточно мінімального значення. Проведіть остаточно усереднення – це і буде заряд електрона.

!! Таблиця 2 може мати декілька варіантів. Наприклад, мати тільки колонки 1 та 2, але в цьому випадку статистичні розрахунки дадуть велику похибку. Або ще мати колонки 3, 4, 5 (в залежності від кількості зарядів). В цьому випадку маємо ще кілька мінімальних різниць для розрахунків середнього значення. Ви можете запропонувати ще якийсь варіант, але врахуйте, що на відміну від Міллікена, ви вже знаєте заряд електрона.

Таблиця 2.

1	2	3	4	5
q_1	$q_1 - q_2$	$q_1 - q_2$	$(q_1 - q_5) - (q_1 - q_2)$	$[(q_1 - q_5) - (q_1 - q_2)] - [(q_1 - q_4) - (q_1 - q_2)]$
q_2	$q_2 - q_3$	$q_1 - q_3$	$(q_1 - q_4) - (q_1 - q_2)$	$[(q_1 - q_5) - (q_1 - q_2)] - [(q_1 - q_3) - (q_1 - q_2)]$
q_3	$q_3 - q_4$	$q_1 - q_4$	$(q_1 - q_3) - (q_1 - q_2)$	-----
q_4	$q_4 - q_5$	$q_1 - q_5$	-----	
q_5	-----	-----		

7. Проведіть статистичні розрахунки [3] та запишіть результат у вигляді

$$q = \langle q \rangle \pm \Delta q, \text{ при } P_\alpha = \dots$$
8. Порівняйте результат з відомим значенням заряду електрона. Визначте відносну похибку.

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Сформулюйте закон збереження заряду.
2. Опишіть експеримент Міллікена. Дайте відповіді на питання: які частинки спостерігають, як вони отримують заряд, як можна змінити заряд на них?
3. Які сили діють на частинки, за якими спостерігають?
4. Виведіть робочу формулу експерименту Міллікена.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савельєв І. В. «Курс общей физики». т. 2: Наука, 1982, - 432 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебник для студ. вузов.-М.: Высш.шк., 1985.-432с.
3. Математичні методи обробки результатів фізичних вимірювань: методичні вказівки щодо виконання лабораторного практикуму за курсом «Фізика» для

здобувачів вищої освіти усіх спеціальностей усіх форм навчання // Укл. В.І. Федун. – Маріуполь: ПДТУ, 2022 – 30 с.