

## РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



### § 40. АБЕТКА ЕЛЕКТРОСТАТИКИ



Усі види сил пружності й тертя мають електромагнітну природу; життєдіяльність рослин, організмів тварин і людей базується на електромагнітних взаємодіях. Вивчає цю взаємодію *електродинаміка* — наука про властивості електромагнітного поля, через яке здійснюється взаємодія електрично заряджених тіл або частинок. Якщо електрично заряджені тіла або частинки перебувають у спокої, їх взаємодія розглядається в розділі електродинаміки, який називають *електростатикою*. З основами електростатики ви ознайомились у курсі фізики 8 класу. А от щоб іти далі, необхідно згадати базові поняття.

#### 1 Що таке електричний заряд

**Електричний заряд  $q$**  — це фізична величина, яка характеризує властивість частинок або тіл вступати в електромагнітну взаємодію.

*Одиниця електричного заряду в СІ — кулон:  $[q]=1 \text{ Кл (С)}$ .*

*1 кулон дорівнює заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за 1 секунду, якщо сила струму в провіднику становить 1 ампер:  $1 \text{ Кл}=1 \text{ А} \cdot \text{с}$  ( $1 \text{ С}=1 \text{ А} \cdot \text{с}$ ).*

#### Основні властивості електричного заряду

1. Існують два роди електричних зарядів — *позитивні й негативні*. Електричний заряд такого роду, як заряд, отриманий на бурштині або ебонітовій паличці, потертих об вовну, прийнято називати негативним, а такого роду, як заряд, отриманий на паличці зі скла, потертій об шовк, — позитивним.

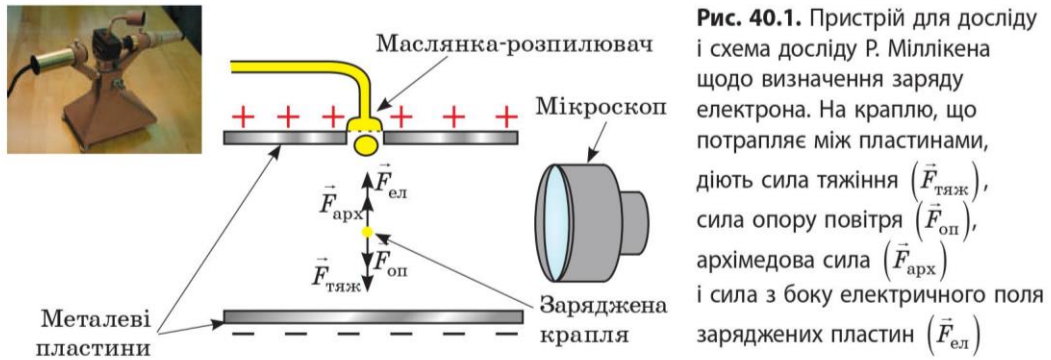
2. Тіла, що мають заряди одного знака, *відштовхуються*; тіла, що мають заряди протилежних знаків, *притягуються*.

3. *Носієм* електричного заряду є *частинка* — електричний заряд не існує окремо від неї.

4. Електричний заряд є *дискретним*, тобто електричні заряди фізичних тіл кратні певному найменшому (елементарному) заряду. *Носій найменшого негативного заряду — електрон*. Цей заряд зазвичай позначають символом  $e$ ; його значення:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . *Носій найменшого позитивного заряду — протон*. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона. Якщо  $q$  — заряд тіла,  $e$  — заряд електрона,  $N$  — ціле число, то  $|q| = N|e|$ .

#### 2 Як був виміряний заряд електрона

Перше досить точне вимірювання елементарного заряду здійснив американський фізик-експериментатор *Роберт Ендрюс Міллікен* (1868–1953) на початку ХХ ст. Схему його дослідів подано на [рис. 40.1](#). У простір між зарядженими пластинами, заряд на яких можна було плавно змінювати,



**Рис. 40.1.** Пристрій для дослідів і схема дослідів Р. Міллікена щодо визначення заряду електрона. На краплю, що потрапляє між пластинами, діють сила тяжіння ( $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ), сила опору повітря ( $\vec{F}_{\text{оп}}$ ), архімедова сила ( $\vec{F}_{\text{арх}}$ ) і сила з боку електричного поля заряджених пластин ( $\vec{F}_{\text{ел}}$ )

вчений впорскував масло. При впорскуванні утворювалися дуже маленькі крапельки, частина з яких несла негативний заряд.

Кожного разу Міллікен спостерігав за окремою зарядженою краплею. Плавно змінюючи заряд пластин, учений домагався, щоб крапля рівномірно піднімалася вгору. Зрозуміло, що в цьому випадку сили, які діяли на краплю, були скомпенсовані. Ураховуючі це, а також те, що сила  $\vec{F}_{\text{ел}}$ , яка діяла на краплю з боку пластин, прямо пропорційна заряду краплі, вчений обчислював заряд краплі.

Багато разів повторюючи вимірювання (історики стверджують, що дослідів тривали майже 4 роки), Міллікен з'ясував, що кожного разу заряд  $q$  краплі був кратним деякому найменшому заряду:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Тобто  $q = Ne$ , де  $N$  — ціле число.

Досліджувані краплі були заряджені негативно, тобто мали надлишкову кількість електронів. Тому вчений зробив висновок, що найменший заряд — це заряд електрона.

Важливий результат роботи Міллікена — не тільки визначення заряду електрона, а й доведення дискретності електричного заряду.

### 3 Що відбувається під час електризації

**Електризація** — це процес одержання електричного заряду макроскопічними тілами або їх частинами.

Є кілька способів електризації, серед них — *електризація тертям* (*трибоелектрика*). Ви вже знаєте, що в процесі електризації тертям відбувається тісний контакт двох тіл, виготовлених із різних матеріалів, і частина електронів переходить з одного тіла на інше. Після роз'єднання тіл виявляється, що тіло, яке віддало частину своїх електронів, заряджене *позитивно*, а тіло, яке одержало ці електрони, заряджене *негативно* (рис. 40.2).



**Рис. 40.2.** Під час електризації тертям частина електронів зі скляної палички перейде на клаптик шовку, в результаті чого скляна паличка набуде позитивного заряду, а клаптик шовку — негативного

За будь-якого способу електризації тіл відбувається *перерозподіл* наявних в них електричних зарядів, а не поява нових. Це твердження є наслідком одного з найважливіших законів природи — **закону збереження електричного заряду**:

Повний заряд електрично замкненої системи тіл залишається незмінним під час усіх взаємодій, які відбуваються в цій системі:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — заряди тіл, які утворюють систему;  $n$  — кількість тіл.

Таким чином, якщо перед електризацією тертям скляної палички об шовкову тканину і паличка, і тканина були незарядженими, то після тертя вони виявляться зарядженими, причому їхні заряди будуть однаковими за модулем і протилежними за знаком. Тобто їхній сумарний заряд, як і перед дослідом, дорівнюватиме нулю.

#### 4 Що визначає закон Кулона

Французький фізик *Шарль Кулон* (1736–1806) експериментально встановив закон, який став *основним законом електростатики* і був названий на його честь, — **закон Кулона**:

Сила  $F$  взаємодії двох нерухомих точкових зарядів  $q_1$  і  $q_2$  прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані  $r$  між ними:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

де  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коефіцієнт пропорційності. Нагадаємо: **точковий заряд** — це фізична модель зарядженого тіла, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.

**Коефіцієнт пропорційності  $k$**  чисельно дорівнює силі, з якою взаємодіють два точкові заряди по 1 Кл кожний, розташовані у вакуумі на відстані 1 м один від одного.

Іноді замість коефіцієнта  $k$  застосовують *інший коефіцієнт* —  $\epsilon_0$ , що має назву

**електрична стала**:  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ .

Тоді математичний запис закону Кулона має

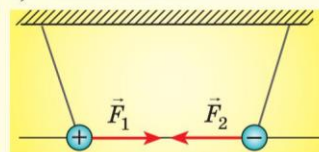
такий вигляд:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$ .

*Зверніть увагу!*

- У законі Кулона йдеться про добуток *модулів* зарядів, оскільки знаки зарядів впливають лише на напрямок сили.

- Сили, з якими взаємодіють точкові заряди, зазвичай називають *кулонівськими силами*.

- Кулонівські сили *напрявлені вздовж прямої, яка з'єднує точкові заряди, що взаємодіють*.



- Якщо треба визначити силу взаємодії зарядів у випадку, коли взаємодіють три заряди чи більше, спочатку визначають сили взаємодії певного заряду з кожним із решти зарядів, а потім розраховують їхню результуючу.

- Якщо заряди перемістити з вакууму в діелектрик, то сила їхньої взаємодії зменшиться в  $\epsilon$  разів, де  $\epsilon$  — діелектрична проникність діелектрика (див. § 43).

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** На прямій, яка з'єднує позитивний заряд  $q_1$  і негативний заряд  $q_2$ , кожен із яких дорівнює за модулем  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл, розташований заряд  $q_3 = -1 \cdot 10^{-8}$  Кл. Відстань  $r_1$  між зарядами  $q_1$  і  $q_3$  дорівнює 6 см, відстань  $r_2$  між зарядами  $q_2$  і  $q_3$  дорівнює 3 см. Обчисліть силу, яка діє на заряд  $q_3$ , якщо він розташований між зарядами  $q_1$  і  $q_2$ .

Дано:

$$|q_1| = |q_2| = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$|q_3| = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

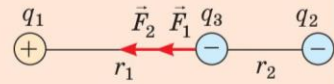
$$r_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$\vec{F}$  — ?

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання

Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому покажемо сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , які діють на заряд  $q_3$  з боку зарядів  $q_1$  і  $q_2$ .



Як видно з рисунка, модуль рівнодійної сили  $\vec{F}$ , з якою заряди  $q_1$  і  $q_2$  діють на заряд  $q_3$ , дорівнює:  $F = F_1 + F_2$ .

За законом Кулона:  $F_1 = k \frac{|q_1||q_3|}{r_1^2}$ ;  $F_2 = k \frac{|q_2||q_3|}{r_2^2}$ .

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:  $[F] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} = \text{Н}$ ;

$$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ (Н)}; \quad F_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ (Н)}$$

$$F = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Н} + 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н} = 6,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$$

Відповідь:  $F = 62,5$  мН.



### Контрольні запитання

1. Що називають електричним зарядом?
2. Назвіть одиницю електричного заряду.
3. Які роди зарядів існують?
4. Як взаємодіють тіла, що мають заряди одного знака? протилежних знаків?
5. Яка частинка має найменший негативний заряд? найменший позитивний заряд?
6. Як ви розумієте твердження, що електричний заряд є дискретним?
7. Хто і як першим виміряв заряд електрона?
8. Якщо електронейтральне тіло віддасть частину своїх електронів, заряд якого знака воно матиме?
9. Чому під час електризації тертям електризуються обидва тіла?
10. Сформулюйте закон збереження електричного заряду.
11. Сформулюйте закон Кулона.



### Вправа № 40

1. Як поводитися ваше волосся відразу після того, як ви стягнули через голлову светр, виготовлений, наприклад, з акрилу? Чому?
2. Як зміниться сила взаємодії двох зарядів, якщо відстань між ними збільшити в 4 рази, а модуль кожного заряду збільшити в 2 рази?
3. Дві однакові маленькі металеві кульки заряджені так, що модуль заряду однієї з них у 5 разів більший, ніж модуль заряду іншої. Кульки змусили торкнутись одна одної і розвели на початкову відстань. У скільки разів змінилася сила взаємодії кульок, якщо перед дотиком вони були заряджені однойменно? різнойменно?
4. На шовковій нитці підвісили маленьку кульку, яка має заряд  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл і масу 2 г. Після того як знизу до неї піднесли другу заряджену кульку, сила натягу нитки, що діє на першу кульку, збільшилась у 2 рази. Визначте відстань між кульками, якщо їхні заряди рівні за модулем.