

§ 4. ЗАКОН КҰЛОНА



Щоб завести механічний годинник, закручують пружину його механізму; щоб менше трясло в автомобілі, застосовують спеціальні пристрої — торсіони. «Стривайте,— скажете ви,— ми ж вивчаємо електрику, а пружини — це механіка». Не кваптеся робити висновки. Із цього параграфа ви дізнаєтеся, як вивчення пружних властивостей дроту допомогло встановити один із фундаментальних законів електростатики.

**Вводимо поняття точкового заряду**

До кінця XVIII ст. електричні явища вивчалися тільки якісно. Наприклад, електричні машини в основному виконували роль іграшок для розваг аристократії. Перехід до кількісних характеристик, а потім і до практичного застосування електрики став можливим тільки після того, як французький дослідник Ш. Кулон (див. рис. 1.5) у 1785 р. встановив *закон взаємодії точкових зарядів*. Після встановлення цього закону вчення про електрику перетворилося на точну науку.

До того як вивчати сам закон, слід розібратися з терміном «точковий заряд». Скористаємося аналогією з механікою, адже поняття «точковий заряд» подібне до поняття «матеріальна точка». Згадайте торішній курс фізики. Наприклад, потяг «Київ–Львів» можна розглядати як матеріальну точку, якщо будувати графік його руху на маршруті між двома містами. А от мураху не можна розглядати як матеріальну точку, якщо, припустимо, розв'язувати задачу про траєкторію руху її передньої лапки.

За аналогією з матеріальною точкою *точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються*.

Виходячи з цього визначення у досліді Р. Міллікена (див. п. 3 § 2) крапельку масла можна розглядати як точковий заряд, а от заряджені пластини — не можна.

Таким чином, точковий заряд, так само як матеріальна точка і точкове джерело світла, є не реальним об'єктом, а фізичною моделлю. Необхідність уведення такої моделі спричинена тим, що в загальному випадку взаємодія заряджених тіл залежить від багатьох чинників, отже, не існує єдиної простої формули, яка описує електричну взаємодію для будь-якого довільного випадку.

**Знайомимося з будовою крутильних терезів**

Військовий інженер Ш. Кулон почав проводити свої дослідження в галузі, вельми далекій від електростатики. Він виявляв закономірності пружного крутіння ниток і встановив залежність сили пружності від кута закручування. Отримані дані дозволили Кулону сконструювати надзвичайно чутливий прилад, який він назвав *крутильними терезами* (їхню будову подано на рис. 4.1, а).

Саме крутильні терези учений пізніше використав для вимірювання сили взаємодії точкових зарядів.

3* Дізнаємося, від чого залежить сила взаємодії двох точкових зарядів

У своїх дослідях Кулон спостерігав взаємодію заряджених кульок. Умови дослідів дозволяли вважати ці кульки точковими зарядами. Досліди вчений проводив так. У скляний циліндр на спеціальному тримачі було поміщено заряджену кульку *C* (рис. 4.1, *б*). Обертаючи верхню кришку циліндра, дослідник домагався, щоб кульки *A* і *C* доторкнулись і частина заряду з кульки *C* перейшла на кульку *A*. Однойменні заряди відштовхуються, тому кульки розходились на деяку відстань. За кутом закручування дроту Кулон визначав силу взаємодії зарядів.

Потім, обертаючи верхню кришку циліндра, дослідник змінював відстань між кульками *A* і *C* та знову визначав силу їхньої взаємодії. Виявилось, що при зменшенні відстані у два, три, чотири рази сила взаємодії кульок збільшувалася відповідно в чотири, дев'ять і шістнадцять разів.

Провівши чимало подібних дослідів, Кулон зробив висновок, що *сила F взаємодії двох точкових зарядів обернено пропорційна квадрату відстані R між ними:*

$$F \sim \frac{1}{R^2}.$$

А як залежить сила F від значення самих зарядів? На той час не існувало методу для вимірювання заряду, і Кулон застосував такий прийом. Спочатку вчений вимірював силу взаємодії двох однакових кульок — *A* і *C*, кожна з яких мала певний заряд q . Потім на мить торкався однієї з цих кульок, наприклад, кульки *C*, кулькою *D* — такою самою, як кульки *A* і *C*, тільки незарядженою. Розміри кульок були однаковими, тому заряд розподілявся між кульками *C* і *D*

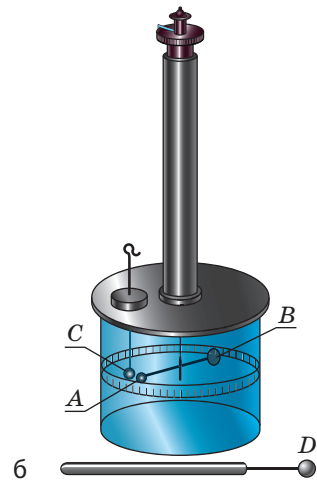
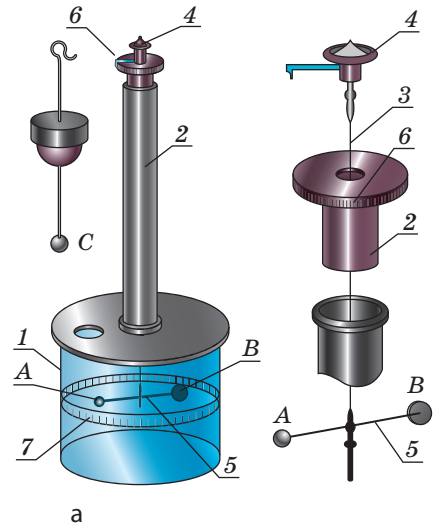


Рис. 4.1. *а* — будова крутильних терезів. Прилад змонтований у скляному циліндрі (1). До верхньої кришки циліндра прикріплена трубка (2), усередині якої розташований пружний дріт (3), прикріплений до головки (4), що обертається. До нижнього кінця дроту підвішене коромисло (5), на кінцях якого розміщують досліджуваний об'єкт (кулька *A*) і противагу (*B*). Крізь отвір у кришці опускають кульку *C*. Кути закручування визначають за допомогою двох шкал із градусними поділками: перша (6) — на верхній кришці, що обертається, друга (7) — на бічній поверхні скляного циліндра; *б* — крутильні терези під час дослідів Кулона

порівну. Отже, на кульці C залишався заряд $\frac{q}{2}$. Після цього Кулон вимірював силу взаємодії зарядів q і $\frac{q}{2}$.

Аналогічно роблячи й далі, учений переконався, що сила F взаємодії двох точкових зарядів q_1 і q_2 пропорційна добутку цих зарядів:

$$F \sim q_1 q_2.$$

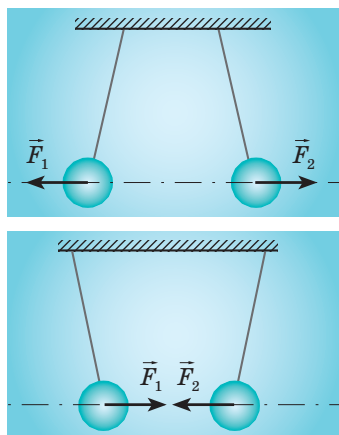


Рис. 4.2. Сили електричної взаємодії (\vec{F}_1 і \vec{F}_2) направлені вздовж умовної прямої, що з'єднує точкові заряди

4 Формулюємо закон Кулона

На підставі проведених дослідів Кулон установив закон, що згодом отримав його ім'я — **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:

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

де k — коефіцієнт пропорційності. Якщо $q_1 = q_2 = 1$ Кл, а $R = 1$ м, то $\{F\} = \{k\}$. Тобто *коефіцієнт пропорційності чисельно дорівнює силі, з якою взаємодіють два точкові заряди по 1 Кл кожний, розташовані у вакуумі* на відстані 1 м один від одного*. Було встановлено, що при взаємодії точкових зарядів у вакуумі $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

Зверніть увагу, що в законі Кулона йдеться про добуток модулів зарядів, оскільки знаки зарядів впливають лише на напрямок сили.

Сили, з якими взаємодіють два точкові заряди, ще називають **силами Кулона**.

Сили Кулона направлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди, що взаємодіють (рис. 4.2).

Маючи кількісне значення коефіцієнта k , можемо оцінити силу, з якою два заряди по 1 Кл кожний взаємодіють на відстані 1 м. Це дуже велика сила! Вона дорівнює, наприклад, силі тяжіння, що діє на великий корабель (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Якби на днищі судна й на відстані 1 м під його днищем можна було розмістити однойменні заряди по 1 Кл кожний, то вдалося б перебороти сили земного тяжіння й без жодних спеціальних пристроїв підняти судно

* У багатьох середовищах ця сила буде значно меншою, ніж у вакуумі. Порівняно з вакуумом у повітрі вона зменшується незначно.

5 **✎** **чимось розв'язувати задачі**

Задача. Дві невеличкі негативно заряджені кульки розташовані в повітрі на відстані 30 см одна від одної. Сила їхньої взаємодії дорівнює 0,32 Н. Обчисліть кількість надлишкових електронів на другій кульці, якщо заряд першої кульки $4 \cdot 10^{-6}$ Кл. Кульки вважати точковими зарядами.

Дано:

$$R = 0,3 \text{ м}$$

$$F = 0,32 \text{ Н}$$

$$q_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

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

 N_2 — ?*Аналіз фізичної проблеми*

Щоб визначити кількість надлишкових електронів, згадаємо, що електричний заряд є дискретним: $|q| = N|e|$, де N — кількість надлишкових електронів, а $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Для визначення заряду q скористаємося законом Кулона.

Пошук математичної моделі, розв'язання

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{R^2}. \text{ Отже, } |q_2| = \frac{FR^2}{k|q_1|} \quad (1).$$

$$\text{Оскільки } |q_2| = N_2|e|, \text{ то } N_2 = \frac{|q_2|}{|e|} \quad (2).$$

Після підстановки (2) в (1) маємо:

$$N_2 = \frac{FR^2}{k|q_1| \cdot |e|}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[N_2] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \text{Кл} \cdot \text{Кл}} = 1;$$

$$\{N_2\} = \frac{0,32 \cdot 0,09}{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5 \cdot 10^{12}.$$

Відповідь: на другій кульці $5 \cdot 10^{12}$ надлишкових електронів.

! **Підбиваємо підсумки**

Точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.

Для двох нерухомих точкових зарядів виконується закон Кулона: сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів прямо пропорційна добутку модулів цих зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

III. Кулон вимірював силу взаємодії точкових зарядів за допомогою спеціально сконструйованих крутильних терезів.



Контрольні запитання

1. Який заряд називається точковим? Порівняйте поняття «точковий заряд» і «матеріальна точка». **2*.** Опишіть будову та принцип дії крутильних терезів. **3*.** Як ϵ . Кулон довів, що сила взаємодії двох точкових зарядів обернено пропорційна квадрату відстані між ними? **4*.** Опишіть прийом, який застосував ϵ . Кулон, щоб з'ясувати залежність сили взаємодії двох точкових зарядів від значення модулів зарядів. **5.** Сформулюйте закон Кулона. **6.** Чому, формулюючи закон Кулона, слід обов'язково користуватися поняттям «точковий заряд»?



Вправа № 4

(*ід час розв'язання задачі і її вправи вважайте, ϵ ома те справ неперіодичними точковими зарядами.*)

- 1.** З якою силою взаємодіятимуть два заряди по $1 \cdot 10^{-4}$ Кл кожний, якщо їх розташувати у вакуумі на відстані 1 м один від одного?
- 2.** Як зміниться сила взаємодії двох зарядів, якщо збільшити кожний із них у 2 рази, а відстань між ними — у 4 рази?
- 3.** Як змінилася відстань між двома зарядами, якщо відомо, що сила їхньої взаємодії збільшилася в 9 разів?
- 4.** Дві кульки, розташовані на відстані 10 см одна від одної, мають однакові негативні заряди. Визначте силу взаємодії кульок, якщо відомо, що на кожній із них є $1 \cdot 10^{11}$ надлишкових електронів.
- 5*.** Дві однакові металеві кульки заряджені так, що заряд однієї з них у 5 разів більший, ніж заряд другої. Кульки змусили доторкнутись одну до одної й розвели на початкову відстань. У скільки разів змінилася сила взаємодії кульок, якщо вони були заряджені однойменно? різнойменно?