

§ 2. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ



Яким є механізм взаємодії зарядів? Яким чином заряди «відчувають» один одного і взаємодіють на відстані? Пошук відповідей на ці та багато інших запитань привів англійського фізика Майкла Фарадея (1791–1867) до ідеї поля, яку Альберт Ейнштейн (1879–1955) пізніше назвав найважливішим відкриттям з часів Ньютона. У курсах фізики 7-го та 9-го класів ви вже зустрічалися з поняттям поля, а зараз ознайомитеся з ним детальніше.



Що називають електричним полем

Згідно з ідеєю М. Фарадея *електричні заряди не діють один на одного безпосередньо. Кожний заряд створює у довколишньому просторі електричне поле, і взаємодія зарядів відбувається через їхні поля.* Взаємодія, наприклад, двох електричних зарядів q_1 і q_2 зводиться до того, що поле заряду q_1 діє на заряд q_2 , а поле заряду q_2 діє на заряд q_1 .

Людина не може безпосередньо, за допомогою органів чуттів, сприймати електричне поле, проте об'єктивність його існування, *матеріальність*, доведено експериментально в ході вивчення електромагнітних хвиль (про це див. у розділі 4 підручника). Поле, як і речовина, є однією з форм існування матерії.

Електричне поле — це форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

Електричне поле є складовою частиною єдиного електромагнітного поля. Джерелом електричного поля можуть бути, крім електричних зарядів, і змінні магнітні поля. Однак незмінне в часі (статичне) електричне поле може бути створене тільки *нерухомими* зарядами. Таке поле називають *електростатичним**.

Зверніть увагу: *електричне поле поширюється в просторі з величезною, але скінченною швидкістю, — швидкістю світла.* Завдяки цій властивості взаємодія між двома зарядами починається не

* У цьому розділі розглядатимемо *нерухомі заряди* і відповідно — *електростатичні поля*. Проте для простоти такі поля іноді називатимемо *електричними*.

миттєво, а через певний інтервал часу $\Delta t = \frac{l}{c}$, де l — відстань між зарядами, а c — швидкість світла у вакуумі. Таке запізнення взаємодії важко виявити на відстанях у декілька метрів, але в космічних масштабах воно є досить помітним.

2 Що прийнято вважати силовою характеристикою електричного поля

Електричне поле, що оточує заряджене тіло, можна досліджувати за допомогою *датчика*, який називають *пробним зарядом*. Зрозуміло, що датчик має не викривляти досліджуване поле, тому в такій функції доцільно використовувати дуже мале заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати. Моделлю такого тіла, як відомо, є *точковий заряд*. (Подумайте, яким вимогам повинне відповідати значення заряду такого датчика.)

Отже, для вивчення електричного поля в деякій точці слід у цю точку помістити пробний заряд q та виміряти силу \vec{F} , яка діє на нього. Очевидно, що в точці, де на заряд діє більша сила, електричне поле є сильнішим. Однак сила, яка діє на пробний заряд в електричному полі, неоднозначно характеризує це поле, бо залежить від значення заряду. А от *відношення* $\frac{\vec{F}}{q}$ не залежить від значення заряду, тож таке відношення можна розглядати як характеристику поля. Цю силову характеристику називають *напруженістю електричного поля*.

Напруженість електричного поля \vec{E} — це векторна фізична величина, яка характеризує електричне поле й дорівнює відношенню сили \vec{F} , з якою електричне поле діє на пробний заряд, поміщений у деяку точку поля, до значення q цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (*)$$

За напрямком вектора напруженості в деякій точці електричного поля беруть напрямок кулонівської сили, яка діяла би на пробний позитивний заряд, якщо б він був поміщений у цю точку поля (рис. 2.1).

Формула (*) дозволяє визначити одиницю напруженості електричного поля — $1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$. *Одиниця напруженості в СІ* — $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. (Те, що $1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$, буде доведено в § 5 підручника.)

Нехай точковим зарядом Q , *розташованим у вакуумі*, створено електричне поле. Щоб знайти напруженість даного поля в довільній точці C ,

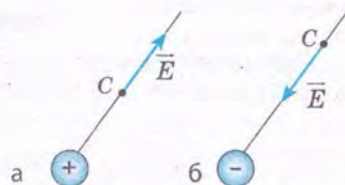


Рис. 2.1. Визначення напрямку вектора \vec{E} напруженості електричного поля в деякій точці C : *а* — поле створене позитивним точковим зарядом Q ; *б* — поле створене негативним точковим зарядом Q

у цю точку слід помістити пробний заряд q . Тоді, скориставшись формулою (*) та законом Кулона ($F = k \frac{|Q||q|}{r^2}$, де F — сила, яка діє на пробний заряд q ; r — відстань від точкового заряду Q до пробного заряду q), отримаємо формулу, яка визначає модуль напруженості \vec{E} електричного поля, створеного точковим зарядом, на відстані r від цього заряду: $E = k \frac{|Q||q|}{r^2|q|}$. Звідси:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}, \quad \text{або} \quad E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$



3

Як формулюється теорема Остроградського — Гаусса*

Формулу $E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ можна також вивести, скориставшись

теоремою Остроградського — Гаусса:

Потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі через замкнену поверхню довільної форми (Φ) чисельно дорівнює алгебраїчній сумі значень q вільних електричних зарядів, розташованих у межах цієї поверхні, поділений на електричну сталу:

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$$

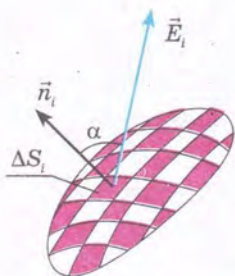


Рис. 2.2. Визначення потоку вектора напруженості довільного електростатичного поля через довільну поверхню

Потік вектора напруженості електростатичного поля через задану поверхню — це фізична величина, яка визначається за формулою: $\Phi = \sum_{i=1}^k E_i \cos \alpha_i \Delta S_i$ (ΔS_i — площа невеликої ділянки, на які розбита поверхня; \vec{E}_i — вектор напруженості на цій ділянці; α — кут між векторами \vec{E}_i і \vec{n}_i) (рис. 2.2).

За допомогою зазначеної теореми розраховують напруженість електричного поля, джерелом якого є не тільки точковий заряд, але й, наприклад, рівномірно заряджені площина ($E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$, де $\sigma = \frac{q}{S}$ — поверхнева густина заряду),

сфера ($E = \begin{cases} 0, & \text{якщо } r < R, \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, & \text{якщо } r > R, \end{cases}$ де Q — заряд сфери).★

4

У чому суть принципу суперпозиції полів

Знаючи напруженість \vec{E} електричного поля, створеного деяким зарядом у даній точці простору, неважко визначити модуль і напря-

* Названа на честь російського математика Михайла Васильовича Остроградського (1801–1862) і німецького математика Карла Фрідріха Гаусса (1777–1855).

мок вектора сили, з якою поле діятиме на будь-який заряд q , поміщений у цю точку:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Якщо ж поле утворене не одним зарядом, а кількома, то, як показує дослід, результуюча сила, що діє на пробний заряд з боку системи зарядів, визначається геометричною сумою всіх сил, з якими діяли б заряди системи окремо на даний пробний заряд.

Звідси випливає **принцип суперпозиції (накладання) електричних полів**:

Напруженість електричного поля системи зарядів у даній точці простору дорівнює векторній сумі напруженостей полів, що їх окремо створили б ці заряди системи в даній точці:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_k = \sum_{i=1}^k \vec{E}_i$$

Відповідно до принципу суперпозиції електричних полів можна знайти напруженість у будь-якій точці поля, створеного, наприклад, двома точковими зарядами q_1 і q_2 (рис. 2.3).

5 Як зробити видимим розподіл поля в просторі

Електричне поле можна зобразити *графічно*, використовуючи так звані *лінії напруженості електричного поля (силові лінії)* — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля (рис. 2.4).

Силові лінії електричного поля мають *загальні властивості* (це впливає з їхнього визначення): вони не перетинаються; не мають зламів; починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних.

Напруженість поля визначена в кожній точці простору, тож силову лінію можна провести через будь-яку точку простору. Таким чином, число силових ліній є нескінченно великим.

Дуже просто побудувати силові лінії поля, створеного відокремленим точковим зарядом (рис. 2.5). Такі «родини» силових ліній полів точкових зарядів демонструють, що заряди є джерелами поля.

На підставі картини силових ліній можна робити висновок не тільки про напрямок вектора напруженості \vec{E} , але й про його модуль.

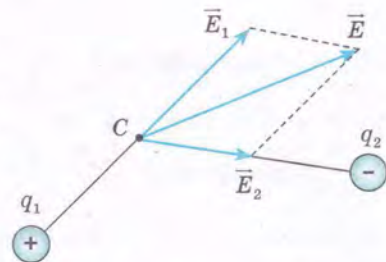


Рис. 2.3. Визначення напруженості електричного поля, створеного двома точковими зарядами q_1 і q_2 , у точці C

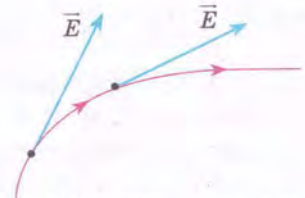


Рис. 2.4. Силова лінія електричного поля (на рисунку зображена червоним)

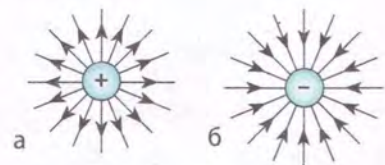


Рис. 2.5. Силові лінії електричного поля, створеного точковим зарядом: а — позитивним; б — негативним

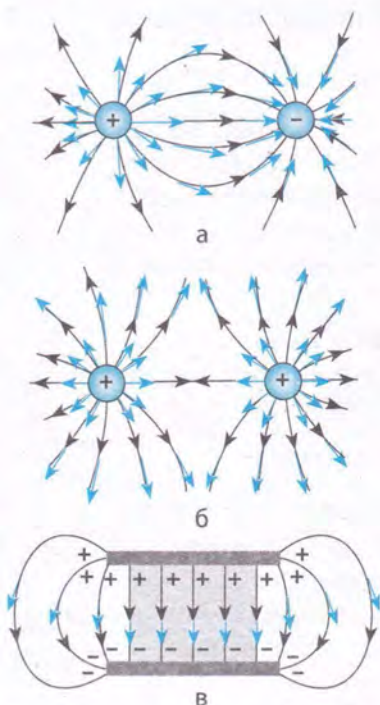


Рис. 2.6. Картини силових ліній електричних полів, створених системою: а — двох різнойменно заряджених кульок; б — двох позитивно заряджених кульок; в — двох пластин, заряди яких рівні за модулем і протилежні за знаком. Синім позначено напрямки векторів напруженості

Справді, для точкових зарядів напруженість поля більшає в міру наближення до заряду, і, як видно з рис. 2.5, силові лінії при цьому згущуються. Можна довести, що модуль напруженості поля прямо пропорційний кількості силових ліній, які перетинають поверхню одиничної площі, перпендикулярну до силових ліній. (Спробуйте довести це самостійно.)

Якщо відстань між лініями напруженості в деякій області простору однакова, то однакова і напруженість поля в цій області. Електричне поле, вектори напруженості якого однакові у всіх точках простору, називають *однорідним*.

Побудувати точну картину силових ліній електричного поля, створеного будь-яким зарядженим тілом, досить важко, саме тому зазвичай обмежуються наближеним зображенням картини, керуючись певною симетрією в розташуванні зарядів (рис. 2.6).

Зверніть увагу на картину силових ліній поля, створеного системою двох різнойменно заряджених пластин (рис. 2.6, в): в області простору між пластинами, розташованій порівняно далеко від країв пластин (на рисунку ця область зафарбована), відстані між лініями напруженості однакові (лінії паралельні), тобто поле в цій області є *однорідним*.

6 Учимося розв'язувати задачі

Задача 1. В однорідне електричне поле, утворене двома вертикальними пластинами, поміщено кульку масою 2,0 г, підвішену на тонкій шовковій нитці. Після того як кульці передали заряд $1,0 \cdot 10^{-6}$ Кл, нитка відхилилася на кут 30° від вертикалі. Визначте напруженість поля.

E — ?

Дано:

$$m = 2 \text{ г} =$$

$$= 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$q = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Аналіз фізичної проблеми. Після того як кульці на нитці передали заряд, на неї почала діяти сила з боку електричного поля пластин ($\vec{F}_{\text{ел}}$), у результаті кулька почала відхилятися від початкового положення. Очевидно, що процес відхилення кульки триватиме доти, доки рівнодійна сил тяжіння $\vec{F}_{\text{тяж}}$ і сили \vec{T} натягу нитки не зрівноважить силу $\vec{F}_{\text{ел}}$. Виконавши пояснювальний рисунок і записавши умову рівноваги для

кульки на нитці з урахуванням формули $\vec{F} = q\vec{E}$, визначимо напруженість поля пластин.

Пошук математичної моделі, розв'язання. Кулька перебуває в рівновазі, тому геометрична сума сил, що діють на неї, дорівнює нулю: $\vec{F}_{\text{ел}} + \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{T} = 0$.

Проекції цього рівняння на осі OX і OY матимуть вигляд:

$$\begin{cases} F_{\text{ел}} - T \sin \alpha = 0, \\ -F_{\text{тяж}} + T \cos \alpha = 0; \end{cases} \begin{cases} F_{\text{ел}} = T \sin \alpha, \\ F_{\text{тяж}} = T \cos \alpha. \end{cases}$$

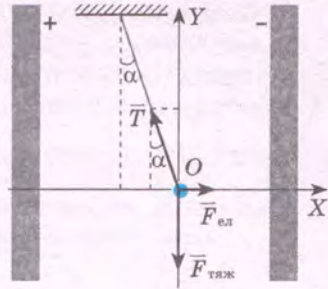
Розділивши перше рівняння на друге, одержимо: $\frac{F_{\text{ел}}}{F_{\text{тяж}}} = \tan \alpha$, або $F_{\text{ел}} = F_{\text{тяж}} \tan \alpha$.

Підставивши в останню рівність вирази для розрахунку модулів сили тяжіння ($F_{\text{тяж}} = mg$) та сили, що діє з боку електричного поля ($F_{\text{ел}} = qE$), маємо: $qE = mg \tan \alpha$, звідки $E = \frac{mg \tan \alpha}{q}$.

Визначимо значення шуканої величини:

$$[E] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}; \{E\} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \sqrt{3}}{10^{-6} \cdot 3} \approx 12 \cdot 10^3, E \approx 12 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$$

Відповідь: напруженість електричного поля пластин становить $E \approx 12 \text{ кН/Кл}$.



Задача 2. У вершинах при гострих кутах ромба, складеного з двох рівносторонніх трикутників зі сторонами $l = 0,25 \text{ м}$, розміщено точкові заряди $q_1 = q_2 = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$. У вершині при одному з тупих кутів ромба розміщений точковий заряд $q_3 = -5,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$. Визначте напруженість електричного поля в четвертій вершині ромба.

E — ?

Дано:

$$l = 0,25 \text{ м}$$

$$q_1 = q_2 = q =$$

$$= 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_3 = -5,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

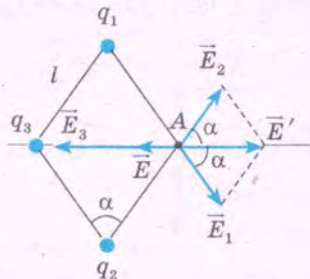
Аналіз фізичної проблеми. У четвертій вершині ромба кожен із трьох зарядів q_1 , q_2 і q_3 створює своє поле, і їх напруженості дорівнюють \vec{E}_1 , \vec{E}_2 і \vec{E}_3 відповідно. Зробивши пояснювальний рисунок і скориставшись принципом суперпозиції, визначимо напруженість поля в четвертій вершині ромба — у точці А.

Пошук математичної моделі, розв'язання. Згідно

з принципом суперпозиції результуюча напруженість \vec{E} в точці А дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створених зарядами q_1 , q_2 і q_3 : $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$.

Оскільки поле створюється системою точкових зарядів, то модуль напруженості поля кожного заряду розраховується за формулою

$$E = k \frac{|q|}{l^2}. \text{ Отже, } E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{l^2}; E_3 = k \frac{|q_3|}{l^2}.$$



Модуль результуючої напруженості E' полів, створених зарядами q_1 і q_2 , дорівнює: $E' = 2E_1 \cos \alpha$, де $\alpha = 60^\circ$, оскільки ромб складений із рівносторонніх трикутників (див. рисунок). Тоді модуль напруженості E у четвертій вершині ромба (точці А) дорівнює:

$$E = E_3 - E' = E_3 - 2E_1 \cos \alpha = k \frac{|q_3|}{l^2} - k \frac{2|q_1| \cos \alpha}{l^2} = k \frac{|q_3| - 2|q_1| \cos \alpha}{l^2}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[E] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{(\text{Кл} - \text{Кл})}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}};$$

$$\{E\} = \frac{9 \cdot 10^9 (5 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5)}{625 \cdot 10^{-4}} = 0,36 \cdot 10^3, \quad E = 0,36 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$$

Відповідь: напруженість поля в четвертій вершині ромба $E = 0,36$ кН/Кл і напрямлена до заряду q_3 .

! Підбиваємо підсумки

Електричне поле — це форма матерії, яка існує навколо заряджених тіл і виявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

Силовa характеристика електричного поля — напруженість \vec{E} :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Теорема Остроградського — Гауса: потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі через замкнену поверхню довільної форми (Φ) чисельно дорівнює алгебраїчній сумі значень q вільних електричних зарядів, розташованих у межах цієї поверхні, поділених на електричну сталу: $\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$.

Напруженість електричного поля системи зарядів у даній точці простору дорівнює векторній сумі напруженостей полів, що їх окремо створили б ці заряди системи в даній точці: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$.

Для графічного зображення полів використовують лінії напруженості електричного поля (силові лінії) — такі лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля.

? Контрольні запитання

1. Що називають електричним полем?
2. Які об'єкти створюють електростатичне поле?
3. Що є силовою характеристикою електричного поля? За якою формулою її розраховують?
4. Чи залежить напруженість поля в даній точці від модуля пробного заряду, поміщеного в цю точку поля? від модуля заряду, який створює поле?
5. У чому полягає принцип суперпозиції полів?
6. Що називають лінією напруженості електричного поля?
7. Чи можуть лінії електричного поля перетинатися?
- ★ 8. Як формулюється теорема Остроградського — Гауса?

Вправа № 2

1. Точковий електричний заряд $8 \cdot 10^{-10}$ Кл розташований у деякій точці електричного поля. Визначте напруженість електричного поля в цій точці, якщо відомо, що поле діє на заряд із силою $2 \cdot 10^{-7}$ Н.
2. Напруженість поля точкового заряду на відстані 30 см від цього заряду дорівнює 600 Н/Кл. Чому дорівнює напруженість поля на відстані 10 см від заряду?

3. Два різнойменні точкові заряди, які мають однакове значення q , розміщені на відстані a один від одного. Знайдіть напруженість поля в точці A , яка ділить відрізок, що сполучає заряди, навпіл; у точках B і C , розташованих на продовженнях цього відрізка, на відстані $\frac{a}{2}$ від кожного заряду (рис. 1).

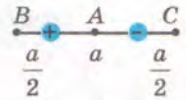


Рис. 1

4. У вершинах квадрата розташовані однакові за модулем позитивні точкові заряди. Чому дорівнює напруженість поля в центрі квадрата?
5. У дві вершини рівностороннього трикутника зі стороною 0,1 м поміщено точкові заряди $+10^{-4}$ і -10^{-4} Кл. Знайдіть значення напруженості поля в третій вершині трикутника.
6. У вершинах квадрата зі стороною a розташовані три негативні й один позитивний заряд. Модулі всіх чотирьох зарядів однакові та дорівнюють q . Якою є напруженість поля, створеного зарядами, у центрі квадрата?

- ★ 7. Поле створене двома рівномірно зарядженими концентричними сферами (рис. 2). Визначте напруженість поля в точках O , A , B , якщо заряди сфер дорівнюють Q_1 і Q_2 , а відстані OA і OB дорівнюють l_1 і l_2 відповідно.

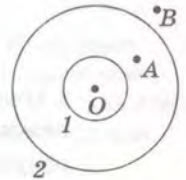


Рис. 2