

§ 42. РОБОТА З ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАРЯДУ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ. ПОТЕНЦІАЛ



У повсякденному житті ми доволі часто, особливо в суху погоду, зустрічаємось із ситуацією, коли, торкнувшись якогось тіла, відчуваємо неприємний удар. Як показує досвід, таких сюрпризів можна чекати від тіл, що мають високий потенціал. Саме з поняттям потенціалу ви ознайомитесь у цьому параграфі.

1 Як розрахувати роботу з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі

Якщо електростатичне поле діє з деякою силою на електрично заряджені тіла, то воно здатне виконати роботу з переміщення цих тіл.

Нехай в однорідному електричному полі напруженістю $\vec{E}$ позитивний точковий заряд q переміщується з точки 1 з координатою x_1 у точку 2 з координатою x_2 (рис. 42.1).

Обчислимо роботу A , яку виконує сила $\vec{F}$, що діє на заряд з боку електростатичного поля. За означенням роботи: $A = F s \cos \alpha$.

Поле однорідне, тому сила $\vec{F}$ є незмінною, її модуль дорівнює: $F = qE$, а $s \cos \alpha = d = x_2 - x_1$ є проекцією вектора переміщення на напрямок силових ліній поля. Отже, *робота сил однорідного електростатичного поля в ході переміщення електричного заряду q із точки 1 у точку 2 ($A_{1 \rightarrow 2}$) дорівнює:*

$$A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1), \text{ або } A_{1 \rightarrow 2} = qEd$$

Зверніть увагу! Якби в даному випадку заряд переміщувався не з точки 1 у точку 2, а навпаки, то знак роботи змінився б на протилежний, тобто робота виконувалася б проти сил поля.

? Який результат було б отримано, якби з точки 1 у точку 2 переміщувався не позитивний, а негативний заряд?

2 Потенціальна енергія зарядженого тіла в полі, створеному точковим зарядом

Заряджене тіло, розміщене в електростатичному полі, так само як тіло, що перебуває в гравітаційному полі Землі, має потенціальну

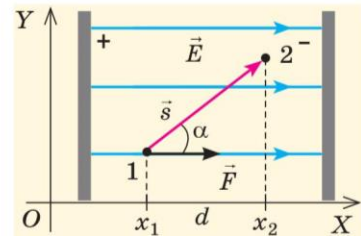


Рис. 42.1. До обчислення роботи сили однорідного електростатичного поля

Зверніть увагу!

Формула $A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1)$ буде справджуватись у випадках руху заряду будь-якою траєкторією. Тобто однорідне електростатичне поле є **потенціальним**. Потенціальним є будь-яке електростатичне поле: робота електростатичних (кулонівських) сил (як і робота гравітаційних сил) не залежить від форми траєкторії, якою переміщується заряд, а визначається початковим і кінцевим положеннями заряду; у випадку замкненої траєкторії руху заряду робота сил поля дорівнює нулю.

енергію. Потенціальну енергію заряду, розташованого в електричному полі, зазвичай позначають символом W_p . Відповідно до теореми про потенціальну енергію зміна потенціальної енергії заряду, взята з протилежним знаком, дорівнює роботі, яку виконує електростатичне поле під час переміщення заряду із точки 1 у точку 2 поля:

$$-\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = A_{1 \rightarrow 2}$$

Потенціальну енергію взаємодії двох точкових зарядів Q і q , розташованих на відстані r один від одного, визначають за формулою:

$$W_p = k \frac{Qq}{r}$$

Зверніть увагу: 1) потенціальна енергія взаємодії зарядів додатна ($W_p > 0$), якщо заряди однойменні, і від'ємна ($W_p < 0$), якщо заряди різнойменні; 2) якщо заряди нескінченно віддалити один від одного ($r \rightarrow \infty$), то $W_p = 0$ (заряди не взаємодіятимуть).

Таким чином, потенціальна енергія взаємодії двох точкових зарядів дорівнює роботі, яку має виконати електростатичне поле для збільшення відстані між цими зарядами від r до нескінченності.

3 Що називають потенціалом електростатичного поля

Потенціал ϕ електростатичного поля в даній точці — це скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості поля і дорівнює відношенню потенціальної енергії W_p електричного заряду, поміщеного в дану точку поля, до значення q цього заряду:

$$\phi = \frac{W_p}{q}$$

Одиниця потенціалу в СІ — вольт: $[\phi] = 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \left(1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right)$.

Із означення потенціалу випливає, що потенціал ϕ поля, створеного точковим зарядом Q , у точках, які розташовані на відстані r від цього заряду, можна розрахувати за формулою: $\phi = k \frac{Q}{r}$ (*).

Із формули (*) бачимо: 1) якщо поле створене позитивним точковим зарядом ($Q > 0$), то потенціал цього поля в будь-якій точці є додатним ($\phi > 0$); 2) якщо поле створене негативним точковим зарядом ($Q < 0$), то потенціал цього поля в будь-якій точці є від'ємним ($\phi < 0$). Формула (*) справджується і для потенціалу поля рівномірно зарядженої сфери (або кулі) на відстанях, які більші за її радіус або дорівнюють йому.

Якщо поле утворене кількома довільно розташованими зарядами, потенціал ϕ поля в будь-якій точці цього поля дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ полів, створених кожним зарядом:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_n$$

4 Як визначають різницю потенціалів

Коли в електростатичному полі заряд рухається з точки 1 у точку 2, це поле виконує роботу, яка дорівнює зміні потенціальної енергії заряду, взятій із протилежним знаком: $A_{1 \rightarrow 2} = W_{p1} - W_{p2}$. Оскільки $W_p = q\varphi$, то $A_{1 \rightarrow 2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Вираз $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — різниця значень потенціалу φ_1 у початковій точці і потенціалу φ_2 у кінцевій точці траєкторії руху заряду — має назву **різниця потенціалів**.

Різниця потенціалів — скалярна фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи сил електростатичного поля з переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$$

Одиниця різниці потенціалів в СІ — **вольт**: $[\varphi_1 - \varphi_2] = 1 \text{ В (В)}$.

Різниця потенціалів між двома точками поля дорівнює 1 В, якщо для переміщення між ними заряду 1 Кл електричне поле виконує роботу 1 Дж.

Зазначимо, що різницю потенціалів $(\varphi_1 - \varphi_2)$ у подібних випадках також називають **напругою** (U). Важливо не плутати зміну потенціалу $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ і різницю потенціалів (напругу) $\varphi_1 - \varphi_2$.

5 Як пов'язані напруженість електростатичного поля і різниця потенціалів

Розглянемо *однорідне* електростатичне поле на ділянці між точками 1 і 2, розташованими на відстані d одна від одної; нехай із точки 1 у точку 2 під дією поля переміщується заряд q (рис. 42.2). Виконувану полем роботу можна подати через різницю потенціалів $(\varphi_1 - \varphi_2)$ між точками 1 і 2: $A_{1 \rightarrow 2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ — або через напруженість $\vec{E}$ поля: $A_{1 \rightarrow 2} = F s \cos \alpha = q E d \cos \alpha = q E_x d$, де $E_x = E \cos \alpha$ — проекція вектора $\vec{E}$ на вісь OX , проведену через точки 1 і 2.

Зіставивши обидва вирази для роботи, маємо: $q(\varphi_1 - \varphi_2) = q E_x d$, звідки: $\varphi_1 - \varphi_2 = E_x d$, або $E_x = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$.

У випадку коли напрямок переміщення заряду і напрямок напруженості електричного поля збігаються ($\vec{E} \uparrow \vec{s}$), ця формула набуває вигляду:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \text{ або } E = \frac{U}{d}$$

? Із останньої формули випливає **одиниця напруженості в СІ — вольт на метр**:

$$[E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \text{ Доведіть, що } 1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

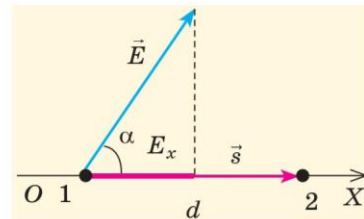


Рис. 42.2. До виведення формули зв'язку напруженості електростатичного поля та різниці потенціалів

Які поверхні називають еквіпотенціальними

Для наочного уявлення електростатичного поля крім силових ліній використовують також *еквіпотенціальні поверхні*.

Еквіпотенціальна поверхня — це поверхня, в усіх точках якої потенціал електростатичного поля має однакове значення.

Для більшої наочності слід розглядати не одну еквіпотенціальну поверхню, а їх сукупність. Проте графічно зобразити сукупність складних поверхонь на одному рисунку дуже важко, тому зазвичай зображують тільки лінії перетину еквіпотенціальних поверхонь певною площиною (рис. 42.3).

Еквіпотенціальні поверхні тісно пов'язані із силовими лініями електростатичного поля. Якщо електричний заряд переміщується по еквіпотенціальній поверхні, то робота поля дорівнює нулю, оскільки $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, а на еквіпотенціальній поверхні $\varphi_1 = \varphi_2$. Цю роботу поля можна також подати через силу $\vec{F}$, що діє на заряд з боку електричного поля: $A = F s \cos \alpha$, де s — модуль переміщення заряду; α — кут між векторами $\vec{F}$ і $\vec{s}$. Оскільки $A = 0$, а $F \neq 0$ і $s \neq 0$, то $\cos \alpha = 0$, отже, $\alpha = 90^\circ$. Це означає, що під час руху заряду вздовж еквіпотенціальної поверхні вектор сили $\vec{F}$, а отже, й вектор напруженості $\vec{E}$ поля в будь-якій точці перпендикулярні до вектора переміщення $\vec{s}$. Таким чином, *силові лінії електростатичного поля перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь* (див. рис. 42.3).

Зверніть увагу! Симетрія еквіпотенціальних поверхонь повторює симетрію джерел поля. Так, поле точкового заряду сферично симетричне, тож еквіпотенціальними поверхнями поля точкового заряду є концентричні сфери; у випадку однорідного поля еквіпотенціальні поверхні — це система паралельних площин.

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Електрон, розпочавши рух із стану спокою, пройшов прискорювальну різницю потенціалів -300 В. Якої швидкості набув електрон? Маса електрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд становить $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Аналіз фізичної проблеми. Заряд електрона — негативний, його початкова швидкість $v_0 = 0$, тому під дією сил поля електрон рухатиметься в напрямку, протилежному напрямку силових ліній поля, тобто в напрямку збільшення потенціалу. Поле буде виконувати додатну роботу, в результаті кінетична енергія електрона і його швидкість зростатимуть. Отже, скористаємося формулою для розрахунку роботи електростатичного поля, поданою через різницю потенціалів, і теоремою про кінетичну енергію.

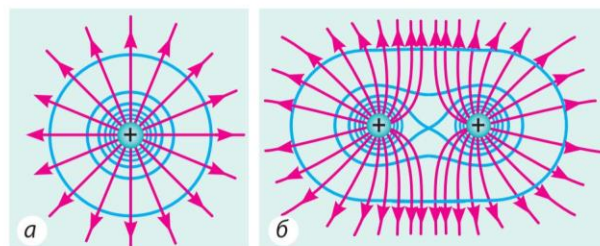


Рис. 42.3. Еквіпотенціальні поверхні (сині лінії) і силові лінії (червоні лінії) простих електростатичних полів, створених: а — позитивним точковим зарядом; б — двома рівними за модулем позитивними точковими зарядами

Дано:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -300 \text{ В}$$

$$v_0 = 0$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

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

v — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання

Згідно з теоремою про кінетичну енергію:

$$A = \Delta W_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}, \text{ де } A = e(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ — робота сил поля.}$$

$$\text{Таким чином, } e(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mv^2}{2}, \text{ звідки } v = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Кл}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot (-300)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ (м/с)}.$$

Відповідь: $v \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$.



Підбиваємо підсумки

- Електростатичне поле є потенціальним. В електростатичному полі робота з переміщення заряду q між двома довільними точками 1 і 2 не залежить від форми траєкторії; дорівнює зміні потенціальної енергії W_p заряду, взятої із протилежним знаком, а у випадку однорідного поля обчислюється за формулою $A_{1 \rightarrow 2} = qEd$.
- Енергетичною характеристикою електростатичного поля є потенціал φ , який визначається відношенням потенціальної енергії W_p електричного заряду, поміщеного в дану точку електростатичного поля, до значення q цього заряду: $\varphi = \frac{W_p}{q}$. Одиниця потенціалу в СІ — вольт (В); $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$.
- Потенціал поля, створеного у вакуумі точковим зарядом Q , у точках, що розташовані на відстані r від цього заряду: $\varphi = k \frac{Q}{r}$. Потенціал поля, створеного системою зарядів: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$.
- Різниця потенціалів між двома точками $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — скалярна фізична величина, що дорівнює відношенню роботи $A_{1 \rightarrow 2}$ сил електростатичного поля з переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до значення q цього заряду: $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$. Напруженість однорідного електростатичного поля пов'язана з різницею потенціалів $(\varphi_1 - \varphi_2)$ співвідношенням $\varphi_1 - \varphi_2 = Ed$.
- Для наочного уявлення електростатичного поля крім силових ліній використовують еквіпотенціальні поверхні — поверхні рівного потенціалу.



Контрольні запитання

- Як визначають роботу однорідного електростатичного поля з переміщення заряду в цьому полі? Чи залежить вона від форми траєкторії руху заряду?
- Чому дорівнює потенціальна енергія взаємодії двох точкових зарядів?
- Що називають потенціалом електростатичного поля?
- Як розраховують потенціал поля точкового заряду?
- Що таке різниця потенціалів?
- Яким є співвідношення

між напруженістю поля і різницею потенціалів для однорідного електростатичного поля? 7. Які поверхні називають екіпотенціальними? 8. Як розташовані лінії напруженості поля відносно екіпотенціальних поверхонь?



Вправа № 42

1. Заряди q і $2q$ розташовані на відстані R один від одного. Як зміниться потенціальна енергія взаємодії зарядів, якщо збільшити вдвічі відстань між зарядами? якщо збільшити вдвічі значення кожного заряду?
2. В однорідному електричному полі напруженістю 500 Н/Кл перемістили заряд $q = -40 \text{ нКл}$ у напрямку силової лінії поля на 15 см . Яку роботу виконало поле? Як змінилася потенціальна енергія заряду?
3. Заряд 2 мкКл перемістили з точки A , розташованої на відстані 10 см від точкового заряду $Q = 5 \text{ мкКл}$, у точку B , розташовану від заряду Q на відстані 5 см . Яку роботу виконало електричне поле? Чи буде ця робота залежати від того, якою траєкторією переміщували заряд?
4. В електростатичному полі із точки з потенціалом 450 В у точку з потенціалом 900 В рухається негативно заряджена частинка. Електричне поле виконує при цьому роботу $1,8 \text{ мкДж}$. Визначте модуль заряду частинки.
5. Електрон, рухаючись зі швидкістю $3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, влітає в електричне поле. Визначте різницю потенціалів, яку необхідно пройти електрону, щоб швидкість його руху зменшилася до $1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$.

Експериментальне завдання

Ви знаєте, як небезпечно торкатися проводу під напругою. Але відомо багато випадків, коли людина або тварина гинули, лише опинившись поряд із відірваним проводом. Виконавши експериментальне завдання, ви зрозумієте, як запобігти таким ситуаціям. Вам знадобляться: два ізольовані товсті проводи завдовжки $10\text{--}15 \text{ см}$ і один такий провід завдовжки $20\text{--}25 \text{ см}$, світлодіод, джерело постійного струму (40 В), дві ємності — із вологим і сухим піском.



1. Зачистіть кінці проводів і виготовте із двох коротших фігурку (див. рисунок).
2. З'єднайте «руки» фігурки зі світлодіодом, «ноги» занурте у вологий пісок.
3. Один кінець довгого проводу приєднайте до позитивного полюсу джерела постійного струму, другий кінець занурте в пісок.

Увімкніть джерело струму та, спостерігаючи за світінням світлодіода, здійсніть низку експериментів: помістіть фігурку спочатку ближче до місця занурення проводу, потім далі; поставте «ступні» фігурки майже впритул одну до одної, потім збільште відстань між «ступнями»; «взуйте» фігурку; занурте «ступні» фігурки в сухий пісок. Зробіть висновки.

Фізика і техніка в Україні

Національний університет «Львівська політехніка» — найдавніший технічний університет Східної Європи (заснований у 1816 р.).

За 200-річну історію університет підготував понад 250 тисяч фахівців, а кожен 12-й львів'янин є його випускником.

В університеті сформувалися наукові школи за напрямками: математика, теоретична та прикладна механіка, радіотехніка, електротехніка, астрономія, геодезія, приладобудування, вимірювальна техніка, наноматеріали і нанотехнології, енерго- та ресурсозберігаючі технології, перспективні комп'ютерні системи та інформаційні технології.