

Потенціал. Напруга.

План заняття

1. Робота, яку виконують сили електричного поля по переміщенню заряду.
2. Потенціал. Різниця потенціалів.
3. Зв'язок між напруженістю і напругою.

1. Робота, яку виконують сили електричного поля по переміщенню заряду.

З погляду теорії близькодії на заряд безпосередньо діє електричне поле, створене іншим зарядом. Під час переміщення заряду, діючи на нього з боку поля сила виконує роботу. Тому можна стверджувати, що заряджене тіло в електричному полі має енергію.

Як обчислити роботу з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі

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

Обчислимо роботу, виконану силами електростатичного поля під час переміщення цього заряду. Робота, виконана силою $\vec{F}$ з переміщення тіла, дорівнює $A = F \cos \alpha \cdot d$. У нашому випадку сила $\vec{F} = q \vec{E}$, а $\cos \alpha = 1$, $d = x_2 - x_1$.

Виходить, робота сил однорідного електростатичного поля під час переміщення електричного заряду із точки 1 у точку 2 дорівнює: $A_{1-2} = qE(x_2 - x_1)$, або $A_{1-2} = qEd$.

Якби заряд переміщався із точки 2 у точку 1, то знак роботи змінився б на протилежний, тому що роботу виконували б проти сил поля. Очевидно, що під час переміщення заряду q із точки 1 у точку 2 і назад була виконана робота, що дорівнює: $A = A_1 + A_2$. Оскільки заряд q повернувся у вихідну точку, то система зарядів залишилася незмінною, а отже, і поле залишилося колишнім. Кожне поле має певну енергію. Енергія в цьому випадку залишилася незмінною, а оскільки робота є мірою зміни енергії, то сумарна робота дорівнює нулю: $A = 0$.

Звідси випливає, що $|A_1| = |A_2|$.

Аналогічні міркування можна провести й у випадку, якщо переміщати заряд q із точки 1 у точку 2 і назад по інших траєкторіях. На підставі вищевикладених міркувань можна зробити висновки:

1) робота в електростатичному полі залежить не від форми шляху, а тільки від положення точок у полі, між якими переміщається заряд;

2) робота з будь-якого замкнутого контуру в електростатичному полі дорівнює нулю.

2. Як обчислити роботу з переміщення заряду в полі, створеному точковим зарядом

Нехай поле створене позитивним точковим зарядом Q , розташованим у вакуумі, а позитивний пробний заряд q рухається в цьому полі із точки 1 у точку 2.

Припустимо, що спочатку заряд q рухався уздовж радіуса на ділянці $1 \rightarrow 2'$, а потім уздовж дуги на ділянці $2' \rightarrow 2$. Тоді робота A_{1-2} поля під час переміщення заряду із точки 1 у точку 2 дорівнює сумі робіт $A_{1-2'}$, і $A_{2'-2}$ на цих ділянках: $A_{12} = A_{12'} + A_{22'}$.

Очевидно, що робота $A_{2'-2}$ дорівнює нулю, оскільки в цьому випадку вектор сили в будь-який момент часу перпендикулярний до вектора переміщення. Щоб визначити роботу $A_{1-2'}$, розіб'ємо весь шлях r заряду на ділянці $1 \rightarrow 2'$ на дуже маленькі відрізки Δr , на яких силу можна вважати постійною. Тоді робота ΔA поля на кожному відрізку Δr дорівнюватиме:

$$\Delta A = F \Delta r = k \frac{Qq}{r^2} \cdot \Delta r.$$

Роботу поля на всьому шляху можна знайти як суму:

$$A_{1-2} = \sum_{r_1}^{r_2} \Delta A_i = \sum_{r_1}^{r_2} F_i \Delta r_i.$$

Звідси можна обчислити роботу, яку виконують сили поля, створеного точковим зарядом Q , під час переміщення пробного заряду q із точки 1 у точку 2:

$$A_{12} = kQq \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

3. Як пов'язана робота й потенціальна енергія

Тіло, що перебуває в потенційному полі, має потенціальну енергію, за рахунок зменшення якої сили поля виконують роботу. Тому заряджене тіло, поміщене в електричне поле, має потенціальну енергію. А різниця її значень у довільних точках 1 і 2 дорівнює роботі, яку повинні виконати сили поля, щоб перемістити заряд із точки 1 у точку 2: $A_{1-2} = W_{n1} - W_{n2}$.

Отже, $A_{1-2} = -\Delta W_n$, де W_{n1} і W_{n2} — потенціальні енергії заряду в точках 1 і 2 відповідно.

Виберемо нульову точку (нагадаємо, що нульовою точкою називається точка, у якій потенціальна енергія заряду дорівнює нулю). Зазвичай за нульову точку вибирають будь-яку точку, що нескінченно віддалена від зарядів, які створюють поле: $W_n \rightarrow 0$, якщо $r \rightarrow \infty$.

У цьому випадку $W_{n2} = 0$, а $W_{1-\infty} = W_{n1}$.

Тобто потенціальна енергія заряду в даній точці електростатичного поля дорівнює роботі, яку повинне виконати поле з переміщення заряду із цієї точки в нескінченність.

$$W_n = k \frac{Qq}{r}.$$

Отже, Таким чином, енергія взаємодії двох точкових зарядів має сенс роботи, яку повинне виконати електростатичне поле для збільшення відстані між цими зарядами від r до нескінченності.

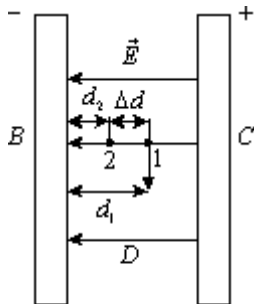
Якщо система складається із зарядів одного знака, то внаслідок дії сил відштовхування заряди намагаються віддалитися один від одного на нескінченно велику відстань.

Тому енергія системи зарядів є позитивною; у результаті видалення зарядів енергія системи зменшується до нуля (графік 1 на рисунку).

Якщо система складається із зарядів протилежних знаків, тоді уже не сили поля, а зовнішні сили мають виконати позитивну роботу, щоб віддалити заряди на нескінченно велику відстань. Тому у разі віддалення зарядів один від

одного енергія їх взаємодії буде збільшуватися до нуля, а від самого початку вона була негативною.

Розглянемо дві пластинки, розміщені вертикально. Ліва пластинка В заряджена негативно, а права С - позитивно. Обчислимо роботу, що виконується полем А під час переміщення заряду q із точки 1, яка знаходиться на відстані d^1 від пластини В, у точку 2, розміщену на відстані $d^2 < d^1$ від тієї ж пластинки. Точки 1 і 2 лежать на одній силовій лінії.



На ділянці шляху $\Delta d = d^1 - d^2$ електричне поле виконує додатну роботу:

$$A = qE(d^1 - d^2) = -(qEd^2 - qEd^1).$$

Оскільки ця робота не залежить від форми траєкторії, то вона дорівнює зміні потенціальної енергії, взятій з протилежним знаком:

$$A = -(W^{p2} - W^{p1}) = -\Delta W^p.$$

Порівнюючи рівняння, бачимо, що потенціальна енергія заряду в однорідному електричному полі

$$W^p = qEd,$$

де заряд q може бути і позитивним, і негативним.

На замкненій траєкторії, коли заряд повертається в початкову точку, робота поля дорівнює нулю:

$$A = \Delta W^p = -(W^{p2} - W^{p1}) = 0.$$

Поля, що мають цю властивість, називають потенціальними (гравітаційні, електростатичні).

2. Потенціал. Різниця потенціалів.

На кожен заряд, розміщений в електричному полі, діє сила, під дією якої він переміщується. При русі заряду електричне поле виконує певну роботу.

Роботу сил електричного поля можна розглядати як зміну потенціальної енергії, яку має кожне заряджене тіло, що перебуває в цьому електричному полі. Якщо позначити потенціальну енергію зарядженого тіла, що переміщується під

дією електричних сил, у початковій і кінцевій точках траєкторії відповідно W_1 і W_2 , то робота сил електричного поля визначатиметься за формулою

$$A = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1).$$

Різні пробні заряди у даній точці поля матимуть різні потенціальні енергії. Водночас відношення потенціальної енергії пробних зарядів до їх значень для даної точки поля є величиною сталою. Фізична величина, яка визначається відношенням потенціальної енергії пробного заряду, що знаходиться у даній точці електричного поля, до значення заряду, називається потенціалом.

Потенціал позначається літерою φ і записується у вигляді

$$\varphi = \frac{W}{q}$$

Потенціал є скалярною величиною. Потенціали точок поля позитивно зарядженого тіла мають додатне значення, потенціали ж негативно зарядженого тіла мають від'ємне значення.

Одиницею потенціалу в СІ є 1 вольт (1В): $1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}$

Потенціал характеризує електричне поле у даній його точці та є його енергетичною характеристикою.

Якщо позначити потенціали точок, в яких перебував пробний заряд до і після виконання роботи силами електричного поля з його переміщення.

відповідно φ_1 , φ_2 і врахувати, що $W = \varphi q$, то можна записати

$$A = W_1 - W_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Значення цієї роботи пропорційне значенню переміщуваного заряду і залежить від того, з якої в яку точку переміщується заряд. Фізична величина (φ_1 і φ_2) називається різницею потенціалів і визначається відношенням роботи з переміщення пробного заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього

$$\text{заряду: } (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A}{q}.$$

Значення потенціальної енергії залежить від вибору початку її відліку (вибору нульового рівня потенціальної енергії). Отже, значення потенціалу

залежить від вибору точки, в якій потенціал дорівнює нулю. Такою точкою у фізиці вважають точку, що знаходиться у нескінченності. Тому потенціал даної точки електричного поля можна визначити як фізичну величину, що показує, яка робота виконується електричними силами під час переміщення одиничного позитивного пробного заряду із даної точки у нескінченність.

Слід зазначити, що поняття «нескінченність», де прийнято вважати $\varphi = 0$, фізично не визначено. Тому під час знаходження потенціалу в довільній точці поля завжди допускають неточність на значення потенціалу в точці, яку вважають розміщеною у нескінченності. Іншими словами, потенціал довільної точки поля визначають завжди з точністю до адитивної сталої. Тому поняття «потенціал» у цьому розумінні дещо фізично не визначено. Більш точним й однозначним поняттям є «різниця потенціалів» як фізична величина, що визначається роботою під час переміщення пробного заряду $q = 1$ Кл між точками поля з потенціалами φ_1 і φ_2 .

На практиці часто буває зручнішим вважати рівним нулю потенціал Землі. Це допустимо, оскільки при будь-яких розрахунках важливо знати різницю потенціалів між деякими точками електричного поля, а не абсолютне значення потенціалів у цих точках. Вимірюють різницю

потенціалів заземленим електрометром, порівнюючи потенціал зарядженого електрометра з потенціалом Землі. Різницю потенціалів в електричному полі називають напругою. Позначають напругу літерою U . Одиницею напруги в СІ є 1 вольт (1 В).

Враховуючи, що $U = \frac{A}{q}$ і $A = qEd$, знаходимо зв'язок між напругою і напруженістю електричного поля:

$$E = \frac{U}{d}$$

Вчені домовилися проводити поверхні так, щоб різниця потенціалів для двох сусідніх поверхонь була всюди одна й та сама. Тоді за густотою еквіпотенціальних поверхонь можна зробити висновок про значення напруженості поля: чим густіше розміщені ці поверхні, тим швидше змінюється потенціал під час переміщення вздовж нормалі до поверхонь і тим більша у

цьому місці напруженість E

3. Зв'язок між напруженістю і напругою.

Точки, в яких потенціал має задане фіксоване значення, розташовуються на поверхнях, що називають екіпотенціальними поверхнями.

Напруженість електричного поля дорівнює різниці потенціалів, яка припадає на одиницю довжини уздовж лінії напруженості.

Оскільки в разі переміщення позитивного заряду в напрямі напруженості електростатичне поле здійснює позитивну роботу, то потенціал 1 більший від потенціалу 2. Отже, напруженість електричного поля напрямлена в бік спадання потенціалу.

У разі переміщення заряду під кутом 90° до силових ліній електричне поле не здійснює роботи, оскільки сила поля перпендикулярна до переміщення. Отже, якщо провести поверхню, перпендикулярну в кожній точці до силових ліній, то в разі переміщення заряду вздовж цієї поверхні робота не здійснюється. А це означає, що лінії напруженості перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь. Екіпотенціальні поверхні однорідного поля є площинами, а поля точкового заряду - концентричними сферами.

Напруженість поля усередині провідника дорівнює нулю, значить, дорівнює нулю й різниця потенціалів між будь-якими точками провідника.

Розв'язування задач.

№1 Яку роботу виконує поле під час переміщення заряду 20 нКл з точки, потенціал якої 700 В , у точку з потенціалом -100 В , у точку з потенціалом 400 В ?

Дано:	Розв'язування
1) $q=20 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$	$A=(\varphi_1 - \varphi_2) \cdot q$
$\varphi_1=700 \text{ В}$	$A_1=(700 \text{ В} - 200 \text{ В}) \cdot 20 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 10^{-5} \text{ Дж} = 10 \text{ мкДж}$
$\varphi_2=200 \text{ В}$	$A_2=(-100 \text{ В} - 400 \text{ В}) \cdot 20 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = -10 \text{ мкКл}$
2) $q=20 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$	
$\varphi_1=-100 \text{ В}$	№2 Напруженість однорідного електричного поля дорівнює 2 кВ/м . В ньому перемістили на 3 см в напрямі силової ліній
$\varphi_2=400 \text{ В}$	заряд -30 нКл . Визначити роботу поля, зміну потенціальної
A-?	енергії взаємодії заряду з полем і різницю потенціалів між

початковою і кінцевою точками переміщення.

Дано:	Розв'язування
$E=2 \cdot 10^3 \text{ В/м}$	За умовою заряд перемістили в напрямі силової лінії, отже:
$\Delta d=3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	$A = E \cdot q \cdot \Delta d$
$Q=-30 \cdot 10^{-9}$	$A = 2 \cdot 10^3 \text{ В/м} \cdot (-30 \cdot 10^{-9}) \text{ Кл} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ м} =$
Кл	$= -1,8 \text{ мкДж}$
$A=?$	$\Delta W_p = 1,8 \text{ мкДж}$
$\Delta W=?$	$A = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot q; \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = E \cdot d$
$(\varphi_1 - \varphi_2)-?$	$\varphi_1 - \varphi_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ В/м} \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 60 \text{ В}$

№3 Електрон перемістився в прискорюючому полі з точки, потенціал якої 200 В, у точку з потенціалом 300В. Визначити кінетичну енергію електрона, зміну потенціальної енергії взаємодії з полем і набуту швидкість. Вважати, що початкова швидкість електрона дорівнює нулеві.

Дано:	Розв'язування
$q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	$\Delta W = -\Delta W_p$
$\varphi_1 = 200 \text{ В}$	$\Delta W_p = -A = q(\varphi_2 - \varphi_1)$
$\varphi_2 = 300 \text{ В}$	$\Delta W = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 100 \text{ В} = -1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$
$v_0 = 0$	$\Delta W_k = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$
$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	$\Delta W_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} \rightarrow \Delta W_k = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow$
$\Delta W_k - ?$	$v = \sqrt{\frac{2\Delta W_k}{m}}$
$\Delta W_p - ?$	$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 0,596 \cdot 10^7 \text{ м/с} = 5,96 \text{ Мм/с}$
$v - ?$	

Контрольні питання:

1. Що таке потенціал поля?
2. Що таке напруга?
3. Як пов'язана робота по переміщенню заряду з різницею потенціалів?
4. Що таке консервативні сили?
5. Чи залежить Робота по переміщенню заряду від форми переміщення?