

## МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНОГО ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИКИ В КЛАСАХ ПРИРОДНИЧО-МАТЕМАТИЧНОГО ПРОФІЛЮ

У статті розглядається методика вивчення електростатики в класах природничо-математичного профілю. Характерною особливістю даної методики є збільшення числа задач-запитань якісно-теоретичного, світоглядно-пізнавального й культурологічного змісту, які використовуються як в процесі пояснення так і закріплення вивченого матеріалу.

**Ключові слова:** методика, теоретичне мислення, електростатика, природничо-математичний профіль.

**Постановка проблеми.** Поява нового покоління підручників з фізики для загальноосвітньої школи авторів: Л. Благодаренко, Є. Коршака, О. Ляшенка, В. Савченка, С. Гончаренка, О. Сергєєва, В. Сиротюка, В. Гоголя, Я. Левшенюка, М. Шута, Т. Засєкіної, Д. Засєкіна та інших, нового покоління збірників задач, використання 12-бальної системи оцінювання навчальних досягнень учнів, перехід до дванадцятирічної школи ставлять задачу побудови ефективних початкових систем, відшукування способів оволодіти ними, реалізацію їх при розробці навчальних матеріалів. Розробка таких систем, враховуючи основні положення особистісно-розвивального навчання, відіграє важливу роль у тому, що зміст освіти пішов назустріч школяреві. **Необхідні методичні розробки для вивчення фізики в профільній школі на рівні стандарту, академічному рівні і рівні професійної орієнтації.**

**Аналіз досліджень і публікацій.** Науково-теоретичне мислення, характерне для сучасника XXI ст., не може обмежуватися лише емпіричним рівнем пізнання фізики (С. Гончаренко, О. Ляшенко, В. Розумовський, А. Павленко) [2, с. 11]. Фізична наука, не сповільнюючи темпів розвитку прикладних застосувань, усе більше теоретизується. Теоретичний рівень пізнання фізики не обмежується законами, хоча й надає їм важливого значення. Внаслідок послідовного вивчення шкільного курсу фізики учень повинен дістати таку систему фізичного знання, яка б відповідала (хоча б в якісному викладі) рівню цілісної фізичної теорії, природничонаукової картини світу.

Теоретичний результат у фізиці – це той, що здобутий шляхом логічних операцій або математичних розрахунків. Повсякчасна праця фізика осяюється світлом теорії, збагачується теоретичним мисленням. **Теоретичне мислення – це вирішення проблем на основі наявних знань у вигляді понять, суджень і логічних висновків. Усе це відбувається з допомогою внутрішнього мовлення, подумки** [1, с. 142-143].

**Мета статті** – розкрити методику теоретичного вивчення електростатики в класах природничо-математичного профілю.

**Виклад основного матеріалу. I. Електроємність.** Утримання великого заряду на окремому провіднику викликає труднощі, провідник повинен мати великий розмір. Проте, в багатьох облаштуваннях (радіоприймачах зокрема та інших) не можуть застосовуватися провідники великих розмірів. Відтак винайшли спосіб нагромадження великого заряду на малих провідниках.

Для цього використовується система провідників, ізольованих один від одного, яка називається конденсатором. Найпростішим конденсатором є пристрій із двох паралельних металевих пластин. Якщо їх зарядити рівними по модулю та протилежними по знаку зарядами, то між ними створюється однорідне електричне поле. Конденсатор може нагромадити значно більший заряд, ніж кожна із його пластин, бо різнойменні заряди утримують один одного.

Якщо конденсатор заряджений, то між його пластинами створюється електричне поле з певною напруженістю, яке також характеризується напругою між пластинами конденсатора. Дослід показує, що зі збільшенням заряду конденсатору в стільки ж само разів збільшується і напруга між його пластинами. Встановлення цієї залежності дозволяє ввести величину, що характеризує конденсатор.

Якщо напруга між пластинами конденсатора пропорційна до його заряду, то відношення  $\frac{q}{U}$  – величина стала для даного конденсатора, і, отже, це відношення може слугувати характеристикою конденсатора.

Із досліду випливає сталість для заданого конденсатора й відношення напруги до заряду  $\frac{U}{q} = const.$

Відповідно до постановленої задачі (напруга між пластинками конденсатора має бути малою при великому заряді на них) слідує, що відношення  $\frac{q}{U}$  має бути якомога більшим, і, чим воно більше, тим краще розв'язується поставлена задача. Отож, саме відношення  $\frac{q}{U}$  доцільно обрати для характеристики конденсатора. Відношення  $\frac{q}{U}$  отримало назву електроємності, і, отже, вона

$$C = \frac{q}{U} \tag{1}$$

Чим більша електроємність, або просто ємність, конденсатора, тим більший заряд йому можна надати при заданій напрузі. Електроємність конденсатора показує, який заряд він може нагромадити при заданій напрузі, тобто показує його місткість (ємність).

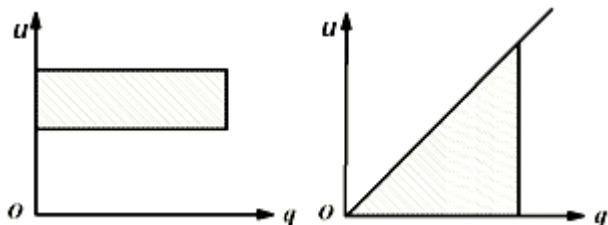
Із формули (1) випливає, що ємність конденсатора чисельно дорівнює заряду, який він може згромадити при напрузі між пластинами в  $1\text{ В}$ . За одиницю електроємності приймають ємність такого провідника (чи конденсатора), потенціал якого змінюється на  $1\text{ В}$  при наданні йому заряду  $1\text{ Кл}$ . Ця одиниця електроємності називається фарад ( $\Phi$ ).

Формулу ємності плоского конденсатора виведемо, використавши залежність напруженості поля, яку створює плоский конденсатор від заряду на його пластинках з площею пластин  $S$ :  $E = \frac{q}{\epsilon_0 S}$ . Звідси  $q = EE_0 S$ , що підставимо у формулу (1). Матимемо:  $C = \frac{EE_0 S}{U}$ . Тут виключимо  $U = Ed$ , де  $d$  – проекція переміщення на силову лінію поля, отримаємо

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} \tag{2}$$

Із формули (2) бачимо, що ємність плоского конденсатора залежить від його розмірів. Цей висновок підтверджує експеримент. Обчислимо енергію зарядженого конденсатора, використавши формулу потенціальної енергії  $W_p = qEd = qU$ . Цей вираз справедливий тоді, коли при переміщенні заряду  $q$  із одної точки поля в іншу різниця потенціалів у цих точках не змінюється (мал. 1). Енергія, потрібна для переміщення заряду, виразиться на рисунках площею, заштрихованого прямокутника, що дорівнює добутку  $qU$ . На початку зарядки незарядженого конденсатора напруга на його обкладках

дорівнює нулю, однак у міру нагромадження заряду напруга збільшується прямо пропорційно до заряду (мал. 2) (вздовж похилої прямої, що проходить через початок координат). І в цьому разі енергія, затрачена на зарядження конденсатора, виразиться площею заштрихованого трикутника. Його площа при відповідному виборі масштабу дорівнює  $\frac{qU}{2}$ . Оскільки  $q = CU$ , то  $W_p = \frac{CU^2}{2}$ .



Мал. 1

Мал. 2

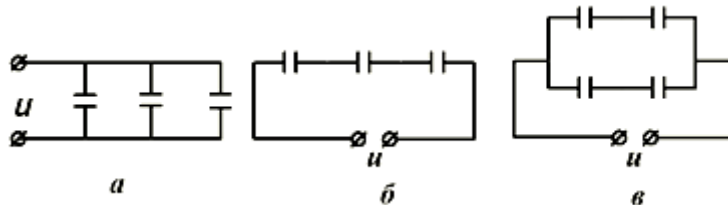
**II. Сполучення конденсаторів.** Кожний конденсатор характеризується ємністю і максимальною робочою напругою. Якщо напруга на конденсаторі досягне великих розмірів, то конденсатор "пробивається" – між обкладками виникає іскра, що руйнує ізоляцію. Для отримання потрібної ємності при заданій робочій напрузі конденсатори часто з'єднують у батареї (рис. 3).

При паралельному з'єднанні конденсатора (рис. 3, а) спільним для всіх конденсаторів є напруга  $U$ , тому  $q_1 = C_1 U_2 = C_2 U_1 \dots q_n = C_n U$ . Сумарний заряд батареї дорівнює:  $q = \sum_{k=1}^n q_k = U \sum_{k=1}^n C_k$ , відтак ємність батареї дорівнює:

$$C = \frac{q}{U} = \sum_{k=1}^n C_k \tag{3}$$

тобто ємність батареї при паралельному з'єднанні конденсаторів дорівнює сумі ємностей окремих конденсаторів.

При послідовному з'єднанні конденсаторів (мал. 3, б) однаковим для всіх конденсаторів, завдяки явищу індукції, буде заряд, рівний повному заряду батареї.



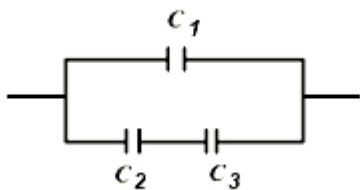
Мал. 3

Тому  $U_1 = \frac{q}{C_1}$ ,  $U_2 = \frac{q}{C_2}$ , ...  $U_n = \frac{q}{C_n}$ . Напряга ж батареї визначається сумою напруг на окремих конденсаторах:  $U = \sum_{k=1}^n U_k = q \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}$ . Відтак для всієї батареї справедлива рівність:

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{q} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad (4)$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів додаються обернені величини ємкостей. Якщо всі конденсатори однакові, ємність кожного  $C_0$ , а загальне їхнє число  $n$ , то  $\frac{1}{C} = \frac{n}{C_0}$ , або  $C = \frac{C_0}{n}$ . Тобто при послідовному з'єднанні  $n$  однакових конденсаторів ємність батареї в  $n$  разів менша за ємність одного конденсатора, в стільки ж само разів напруга на кожному конденсаторі менша ніж напруга батареї (чим збільшується допустима напруга батареї порівняно з допустимою напругою одного конденсатора).

На рис. 3, в показано змішане з'єднання конденсаторів. Ємність такої батареї легко визначається по формулах (3) і (4).

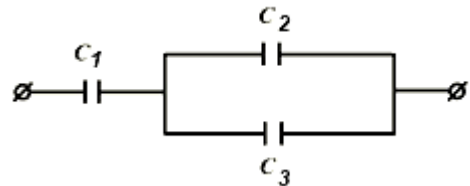


Мал. 4

**Задача 1.** Ємність батареї конденсаторів на мал. 4 дорівнює 5,8 мкФ. Які ємність і заряд першого конденсатора, якщо  $C_2 = 1,0$  мкФ,  $C_3 = 4,0$  мкФ, а підведена напруга 220 В?

**Розв'язання.** Очевидно ємність  $C_{2-3} = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} = 0,8$  мкФ, а ємність батареї  $UC = (C_1 + C_{2-3}) \cdot U$ , звідки  $C_1 = C - C_{2-3} = 5$  мкФ. Заряд  $q_1 = C_1 U = 1,1$  мкФ.

**Задача 2.** Три конденсатори з ємностями  $c_1 = 1,0$ ,  $c_2 = 1,0$ ,  $c_3 = 2$  мкФ з'єднані по схемі, зображеній на мал. 5 і підімкнені до джерела постійної напруги 120 В. Яка їх спільна ємність? Визначити заряд і напругу на кожному із конденсаторів.

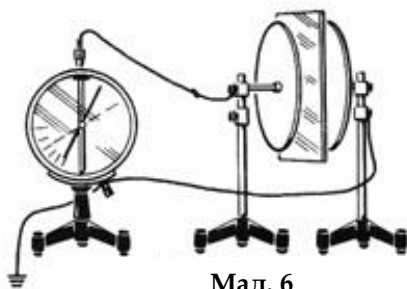


Мал. 5

**Розв'язання.**  $c_{2,3} = c_2 + c_3 = 3$  мкФ. Ємність батареї  $c_6 = \frac{c_1 \cdot c_{2,3}}{c_1 + c_{2,3}} = 0,75$  мкФ. Заряд батареї  $q_6 = c_6 U = 9 \cdot 10^{-5}$  Кл,

водночас  $q_1 = 9,0 \cdot 10^{-5}$  Кл,  $q_2 + q_3 = 9,0 \cdot 10^{-5}$  Кл,  $\frac{q_3}{q_2} = \frac{c_3}{c_2} = 2$ ;  $q_2 = \frac{1}{2} q_3$ ,  
 $\frac{3}{2} q_3 = 9,0 \cdot 10^{-5}$ ;  $q_3 = 6,0 \cdot 10^{-5}$  Кл;  $q_2 = 3,0 \cdot 10^{-5}$  Кл.  $U_1 = \frac{q_1}{c_1} = 90$  В,  $U_2 = \frac{q_2}{c_2} = 30$  В,  $U_3 = \frac{q_3}{c_3} = 30$  В.

**III. Діелектрики в електричному полі.** При внесенні провідника в електричне поле в ньому відбувається перерозподіл заряду. Внаслідок цього при рівновазі зарядів електричне поле всередині провідника зникає. Що зміниться в діелектрику, якщо його внести в електричне поле, і як це вплине на поле в діелектрику?



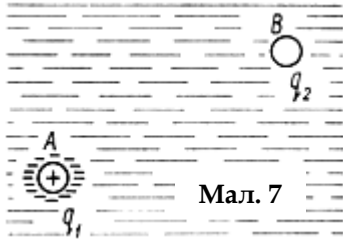
Мал. 6

Для цього заряджають плоский конденсатор, пластини якого з'єднані з електрометром. Фіксують, що при заданому заряді пластин між ними існує поле, що характеризується певною напругою, яку показує електрометр. Розміщуючи між пластинами конденсатора скляну пластину, помічають, що це призводить до зменшення показів електрометра (мал. 6). Це при тому, як площа взаємодії пластин, відстань між ними і заряд пластин залишаються сталими. Отож, зменшення напруги й напруженості поля ( $E = \frac{U}{d}$ ) пов'язано з внесенням діелектрика. Вносячи в конденсатор інші діелектрики, зазначають, що всі вони зменшують напругу, але по-різному. Чому внесення діелектрика зменшує напруженість поля між пластинами? Тут

досить розглянути механізм поляризації у полярних діелектриків. Причиною ослаблення поля в діелектрику є його поляризація.

Відношення ємності конденсатора з діелектричною пластинною між обкладками (с) та без неї ( $\epsilon_0$ ) називається діелектричною проникністю ( $\epsilon$ ). Отже,  $\epsilon = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ .

У діелектрику послаблюється взаємодія зарядів. Це впливає з того, що поле, створене одним із зарядів, послаблюється діелектриком в  $\epsilon$  разів і тому воно діє з меншою силою на інший заряд.



Мал. 7

Послаблення взаємодії зарядів у діелектрику в порівнянні з їхньою взаємодією у вакуумі можна пояснити мал. 7. У точці А і В всередині діелектрика знаходяться заряди  $q_1$  і  $q_2$ . Внаслідок поляризації діелектрика біля заряду  $q_1$  утворюється заряд протилежного знаку. В цьому разі на заряд  $q_2$  діятиме як додатній заряд  $q_1$ , так і від'ємний, що утворився навколо  $q_1$ . Через це сила, що діє на заряд  $q_2$ , буде меншою, ніж якби обидва заряди були у вакуумі. Точно так само зменшиться дія заряду  $q_2$  на заряд  $q_1$ .

З цього випливає, що закон Кулона для зарядів, розміщених у діелектрику, має вид  $F = \frac{k|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$ , або  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$ . Відповідно до цього зміняться також формули, які являються водночас наслідком закону Кулона.

На підставі формули електроємності  $C = \frac{q}{U}$  роблять висновок, що зменшення напруги під час внесення діелектрика при незмінному заряді конденсатора означає збільшення його ємності. У відповідності з цим висновком виходить формула ємності плоского конденсатора з діелектриком між його пластинами

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}. \tag{5}$$

Ця формула може бути використана для експериментального визначення діелектричної проникності  $\epsilon = \frac{C}{\epsilon_0}$ .

Завдяки високим ізоляційним властивостям діелектрик дозволяє створювати між пластинами значно більші напруги, ніж тоді, як між пластинами знаходиться повітря. Тому на конденсаторах, крім їхньої ємності, зазначається і максимальна напруга, яку вони витримують без руйнування.

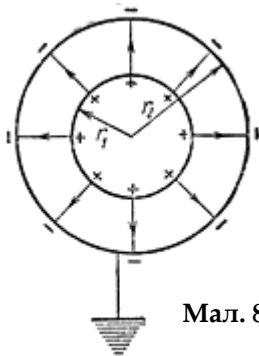
**Задача 3.** Чи завжди однакові ємності двох однакових ізольованих провідників?

**Відповідь.** Ні, в присутності інших провідників їхні ємності змінюватимуться.

**Задача 4.** Між пластини зарядженого плоского конденсатора паралельно до них ввели лист діелектрика, товщина якого вдвічі менша, ніж відстань між пластинами. Визначити ємність конденсатора, якщо площа кожної пластини  $S$ , відстань між пластинами  $l$  і діелектрична проникність діелектрика  $\epsilon$ . Довести, що ємність не залежить від положення діелектрика.

**Розв'язання.** Маємо батарею двох послідовно з'єднаних конденсаторів з ємностями  $c_1 = \frac{2\epsilon\epsilon_0 S}{l}$  і  $c_2 = \frac{2\epsilon\epsilon_0 S}{l}$ , її ємність знайдемо з рівності  $\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}$ , звідки  $c = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} = \frac{2\epsilon\epsilon_0 S}{l(1+\epsilon)}$ . Електричне поле батареї однорідне (його силові лінії паралельні), тому ємність  $C$  не залежить від положення діелектрика.

**IV. Сферичний конденсатор.** Сферичний конденсатор складається із двох концентричних кульових обкладок, розділених сферичним шаром діелектрика. Якщо внутрішній обкладці такого конденсатора надати заряд  $+q$ , то на зовнішній заземленій обкладці утвориться індукований заряд  $-q$ , (мал. 8).



Поле сферичного конденсатора зосереджене між обкладками й таке, нібито заряд зосереджений у центрі сфери. Тому потенціали обкладки дорівнюють:  $\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon\phi r_1}$ ,  $\varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon\phi r_2}$ . Напруга на конденсаторі дорівнює:

$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{q(r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1 r_2}$ , що дозволяє знайти електроємність сферичного конденсатора. Згідно з (1):

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \tag{6}$$

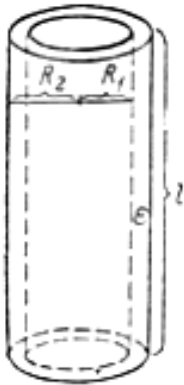
Якщо  $d = r_2 - r_1 \ll r_1$ , то  $r_2 \approx r_1 = r$  і відповідно  $C = \frac{4\pi\epsilon_0 r^2}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ , де  $S = 4\pi r^2$  – площа поверхні сферичної обкладки. Отже, при малому проміжку порівняно з радіусом сфери вирази для ємності сферичного й плоского конденсаторів збігаються.

Якщо зовнішній радіус сферичного конденсатора значно більший, ніж внутрішній радіус, то формула (6) спрощується:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r_1, \quad (7)$$

тобто в цьому випадку ємність дорівнює ємності відокремленої кулі радіусом  $r_1$ .

**V. Циліндричний конденсатор.** Цей конденсатор являє собою два коаксіальних порожнистих циліндри радіусів  $R_1$  і  $R_2$  і спільної довжини  $l$  (мал. 9). Простір між циліндрами заповнено середовищем з діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Вивід формули електроємності циліндричного конденсатора дещо ускладнений, тому напишемо остаточний вираз цієї ємності



Мал. 9

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (8)$$

Якщо проміжок між обкладками відносно малий, тобто виконується умова  $d = R_2 - R_1 \ll R_1$ , знаменник формули (8) можна перетворити таким чином:  $\ln \frac{R_2}{R_1} = \ln \left( 1 + \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right) \approx \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{d}{R_1}$  (Скориставшись формулою  $\ln(1+x) \approx x$ , якщо  $x \ll 1$ ). Тоді  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ , де  $S = 2\pi R_1 l$  – площа обкладки конденсатора. Отож, у випадку малого проміжку ємність циліндричного конденсатора можна ототожнювати з формулою плоского конденсатора (5).

**Задача 5.** Знайти ємність сферичного конденсатора, якщо між його обкладками розмістили провідний шар товщиною  $d < R_1 - R_2$ . Радіус зовнішньої поверхні цього шару  $R_0$ .

**Розв’язання.** Електроємність сферичного конденсатора  $C = C_1 - C_2$ , де

$$C_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} = 2\pi\epsilon_0 \frac{1}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}; C_2 = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_0 (R_0 - d)}{R_0 - (R_0 - d)} = 4\pi\epsilon_0 \frac{1}{\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 - d}}.$$

Відтак 
$$C = \frac{4\pi\epsilon}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} - \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 - d}} = 4\pi\epsilon_0 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_0 - d} \right)^{-1}.$$

**VI. Енергія системи зарядів.** Робота сили з якими взаємодіють заряджені тіла не залежить від шляху. Тож система заряджених тіл має потенціальну енергію. Знайдемо вираз для потенціальної системи точкових зарядів. Спочатку розглянемо систему із двох зарядів  $q_1$  і  $q_2$ , що знаходяться на відстані один від одного  $r_{1,2}$ . Робота перенесення заряду  $q_1$  із нескінченості в точку, віддалену від  $q_2$  на  $r_{1,2}$

$$A_1 = q_1 \varphi_1 = q_1 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_{1,2}}, \quad (9)$$

де  $\varphi_1$  – потенціал, створений зарядом  $q_2$  в тій точці, в яку переноситься заряд  $q_1$ .

Так само робота перенесення заряду  $q_2$  із нескінченості в точку, віддалену від  $q_1$  на  $r_{1,2}$  дорівнює

$$A_2 = q_2 \varphi_2 = q_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_{1,2}}, \quad (10)$$

де  $\varphi_2$  – потенціал, створений зарядом  $q_1$  у точці, в яку переміщається заряд  $q_2$ .

Значення робіт (9) і (10) однакові, і кожне з них виражає енергію системи  $W = q_1\varphi_1 = q_2\varphi_2$ , або  $W = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2)$ . Це енергія системи двох зарядів.

Перенесемо із нескінченності ще один заряд  $q_3$  і помістимо його в точку, що знаходиться на відстані  $r_{1,3}$  від  $q_1$  і  $r_{2,3}$  від  $q_2$ . При цьому ми виконаємо роботу  $A_3 = q_3\varphi_3 = q_3 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_{1,3}} + \frac{q_2}{r_{2,3}} \right)$ , де  $\varphi_3$  – потенціал, створений зарядами  $q_1$  і  $q_2$  в тій точці, в яку ми помістили заряд  $q_3$ . У сумі з  $A_1$  чи  $A_2$  робота  $A_3$  дорівнюватиме енергії трьох зарядів:  $A_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}} + q_3 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_{1,3}} + \frac{q_2}{r_{2,3}} \right)$ . Цьому виразу можна придати вигляд  $W = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( q_1 \left( \frac{q_2}{r_{1,2}} + \frac{q_3}{r_{1,3}} \right) + q_2 \left( \frac{q_1}{r_{1,3}} + \frac{q_3}{r_{2,3}} \right) + q_3 \left( \frac{q_1}{r_{1,3}} + \frac{q_2}{r_{2,3}} \right) \right) = \frac{1}{2} (q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2 + q_3\varphi_3)$ , де  $\varphi_1$  – потенціал, створений зарядами  $q_2$  і  $q_3$  у тій точці, де розміщений заряд  $q_1$  і т. д. Додавляючи до системи зарядів послідовно  $q_4, q_5$  і т. д., можна переконатися в тому, в разі  $N$  зарядів потенціальна енергія системи дорівнює

$$W = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i, \tag{11}$$

де  $\varphi_i$  – потенціал, створений у тій точці, де знаходиться  $q_i$  всіма зарядами, крім  $i$ -го.

**VII. Енергія зарядженого провідника.** Заряд  $q$  на деякому провіднику, можна розглядати як систему точкових зарядів  $\Delta q$ . Така система володіє енергією, що дорівнює роботі, яку треба виконати, щоб перемістити всі заряди  $\Delta q$  із нескінченності і розмістити на поверхні провідника.

Перенесення із нескінченності на поверхню провідника першої порції заряду  $\Delta q$  не супроводиться виконанням роботи, оскільки потенціал провідника спочатку дорівнює нулю. Внаслідок надання провіднику заряду  $\Delta q$  його потенціал стає відмінним від нуля, через що перенесення другої порції  $\Delta q$  вже вимагає виконання певної роботи. Позаяк у міру збільшення заряду на провіднику потенціал його зростає, при переміщенні кожної наступної порції заряду  $\Delta q$  має виконуватися все більша по величині робота

$$\Delta A = \varphi \Delta q = \frac{q}{C} \Delta q, \tag{12}$$

де  $\varphi$  – потенціал провідника, зумовлений уже існуючим на ньому зарядом  $q$ ,  $C$  – ємність провідника.

Робота (12) іде на збільшення енергії провідника. Тому, переходячи до диференціалів, маємо  $\Delta W = \frac{1}{C} q dq$ , звідки, інтегруючи, отримуємо вираз для енергії:  $W = \frac{q^2}{2C} + const.$

Природно вважати енергію незарядженого провідника рівною нулю. Тоді стала також перетвориться на нуль, Враховуючи (1), можна записати

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2}. \tag{13}$$

Формулу (13) можна отримати також шляхом інших міркувань.

**VIII. Енергія зарядженого конденсатора.** Процес виникнення на обкладках конденсатора зарядів  $+q$  і  $-q$  можна уявити так, що від одної обкладки послідовно віднімаються дуже малі порції заряду  $\Delta q$  й переміщуються на другу обкладку. Робота перенесення чергової порції дорівнює  $\Delta A = \Delta q(\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta q U$ , де  $U$  – напруга на конденсаторі. Замінивши  $U$  відповідно до формули  $c = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$  конденсатора й переходячи до диференціалів, отримаємо  $dW = dA = U dq = \frac{q}{c} dq$ . Інтегруючи цей вираз, приходимо до формули для енергії зарядженого конденсатора

$$W = \frac{q^2}{2c} = \frac{qU}{2} = \frac{cU^2}{2}. \tag{14}$$

Формула (14) відрізняється від формули (13) тільки заміною  $\varphi$  на  $U$ .

**Задача 6.** Енергія  $W$  кожної системи пов'язана з масою цієї системи співвідношенням Ейнштейна  $W = mc^2$ . Відтак електричне поле володіє масою. Припустимо, що вся маса електрона "електрична". Визначте класичний радіус  $R$  електрона, вважаючи, що заряд розподілений по його поверхні.

**Розв'язання.** Маємо рівняння  $mc^2 = \frac{q^2}{2C}$ , де  $C = 4\pi\epsilon_0 R$ , звідки  $R = \frac{e^2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 mc^2}$ , де  $e$  – заряд електрона,  $m$  – маса електрона,  $c$  – швидкість світла у вакуумі. Це табл. дані. Підставивши числові значення величин отримаємо  $R = 1,4 \cdot 10^{-15}$  м.

**Задача 7.** Суцільна парафінова куля радіусом  $R$  заряджена рівномірно по об'єму з об'ємною густиною  $\rho$ . Визначити енергію  $W_1$  електричного поля зосереджену в самій кулі і енергію  $W_2$  поза нею.

**Розв'язання.**  $W_1 = \frac{1}{2} \int_0^R \varphi dr$ , де  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r}$  і  $q = \frac{4}{3} \pi r \rho r^2$ . Величина  $r \ll R$ . Враховуючи, що  $\int q dq = \frac{q^2}{2} = \frac{16}{2 \cdot 9} \pi^2 \rho^2 dR$ , отримаємо  $W_1 = \frac{2\pi \rho^2 R^5}{45 \epsilon_0 \epsilon}$ . Для  $W_2 = \frac{2\pi \rho^2 R^5}{9 \epsilon_0}$ .

**Задача 8.** Ємність плоского конденсатора  $C = \frac{1}{9} \cdot 10^{-9}$  Ф. Діелектрик фарфор ( $\epsilon = 5$ ). Конденсатор зарядили до різниці потенціалів  $U = 600$  В і відключили від джерела напруги. Яку роботу треба виконати, щоб вийняти діелектрик із конденсатора. Тертя діелектрика об пластини знехтувати.

**Розв'язання.** Енергія конденсатора до розряджання  $W_1 = \frac{cU^2}{2}$ , а після того, як вийняли діелектрик,  $W_2 = \frac{1}{\epsilon} \frac{cU^2}{2}$ . Тоді  $A = W_1 - W_2 = \frac{cU^2}{2} \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) = 8 \cdot 10^6$  Дж.

**Задача 9.** Визначити ємність конденсатора, обкладки якого являються листи станіолу площею  $4,7 \cdot 10$  см<sup>2</sup>, прокладені 15 листами парафінового паперу ( $\epsilon = 2$ ) товщиною 0,03 мм.

**Відповідь.** 0,04 мкФ. Врахувати, що при послідовному сполученні  $n$  однакових конденсаторів з електроємністю  $c_0$ , кожний  $c = \frac{c_0}{n}$ , де  $c_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ .

**Задачі і запитання для самостійного розв'язання**

1. Площа обкладок плоского конденсатора  $S$ , відстань між ними  $d$ .

а) Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його обкладками розмістити металеву пластинку товщиною  $\frac{d}{3}$  і площі  $S$ ? б) Як зміниться ємність конденсатора, якщо між його обкладками розмістити металеву пластинку тієї ж самої товщини  $\frac{d}{3}$ , але площі пластин  $S' < S$ ? в) Чи зміниться ємність конденсатора, якщо пластина торкнеться одної з обкладок?

2. Чи можна, маючи два однакових конденсатори, отримати ємність, вдвічі меншу і вдвічі більшу, ніж одного із них? Якщо можна, то як це зробити?

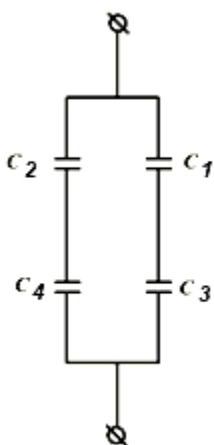
3. Три послідовно сполучені конденсатори з ємностями  $c_1 = 0,1$  мкФ,  $c_2 = 0,25$  мкФ і  $c_3 = 0,5$  мкФ увімкнуті до джерела струму з напругою  $U = 32$  В. Знайти напруги  $U_1, U_2, U_3$  на конденсаторах?

4. Обчислити загальну ємність конденсаторів, увімкнених по схемі, зображеній на мал. 10. Ємність конденсаторів  $c_1 = 0,1$  мкФ,  $c_2 = 5$  мкФ,  $c_3 = 6$  мкФ і  $c_4 = 5$  мкФ.

5. Конденсатор складається з двох концентричних сфер. Радіус внутрішньої сфери  $R_1 = 10$  см, зовнішньої  $R_2 = 10,2$  см. Проміжок між сферами заповнений парафіном. Внутрішній сфері надали заряд  $9 \cdot 10^{-6}$  Кл. Визначити різницю потенціалів  $U$  між сферами.

6. Площа кожної пластини плоского слюдяного конденсатора 300 см<sup>2</sup>, товщина слюди 1,0 мм. Яка різниця потенціалів була прикладена до пластин, якщо відомо, що при розрядці конденсатора виділилося 0,21 Дж теплоти.

**Відповіді.** 1. а) Збільшиться в півтора рази. б) Збільшиться в  $1 + \frac{S'}{2S}$  разів. в) Не зміниться. 2. Так, у першому випадку з'єднали конденсатори послідовно, в другому – паралельно. 3.  $U_1 = 20$  В,  $U_2 = 8$  В,  $U_3 = 4$  В. 4.  $c_1 = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} + \frac{c_3 c_4}{c_3 + c_4} = 4,5$  мкФ. 5. 4,0 В. 6. 15 кВ.



Мал. 10

**Висновки.** У статті наведений приклад методики теоретичного вивчення теми з фізики "Електростатика" в класах природничо-математичного профілю.

Характерною особливістю даної методики є збільшення числа задач-запитань якісно-теоретичного, світоглядно-пізнавального й культурологічного змісту. Перед учнями ставляться узагальнені питання-проблеми, відповідь на які вимагає не переоповідання готових міркувань і висновків підручника або оголошених учителем, а творчих пошуків і зусиль, глибокого розуміння суті явищ і вміння застосовувати знання на практиці. Попрацювавши із задачами й питаннями самостійно, учень має можливість порівняти свої результати й висновки із відповідями наведеними в кінці теми. Задачі-запитання даються також безпосередньо під час пояснення вчителем основних положень, законів відповідної теми фізики.

### Використані джерела

1. Дубровська Д. М. Основи психології : навч. посіб. / Д. М. Дубровська. – Львів : Світ, 2001. – 280 с.
2. Розв'язування навчальних задач з фізики: питання теорії і методики / С. У. Гончаренко, Є. В. Коршак, А. І. Павленко і інші; за заг. ред. Є. В. Коршака. – К. : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2004. – 185 с.
3. Засєкіна Т. М. Фізика: підруч. для 11 кл. загальноосвіт. навч. закл.: (академічний рівень, профільний рівень) / Т. М. Засєкіна, Д. О. Засєкін. – Харків: Сиція, 2011. – 336 с.
4. Коршак Є. В. Фізика: підруч. для загальноосвіт. навч. закл.: рів. стандарту / Є. В. Коршак, О. І. Ляшенко, В. Ф. Савченко. – К. : Генеза, 2011. – 256 с.
5. Новак О. Ф. Ідеї теоретичного пошуку в курсі фізики середньої школи / О. Ф. Новак, М. В. Остапчук // Фізика. – 2000. – № 25(73). С. 2-3.

*Ostapchuk M., Ostapchuk B.*

### METHODS OF THEORETICAL STUDY ELECTROSTATICS IN CLASSROOMS NATURAL MATHEMATICAL STRUCTURE

*The article is an example of methods of theoretical study of topics in physics "electrostatics" in the classes of natural mathematical structure.*

*A characteristic feature of this method is to increase the number of quality problems, questions and theoretical, ideological and cultural and educational logical sense. Students are asked questions, problems, the answer to which requires finished reasoning and conclusions of the textbook or teacher announced by and creative research and effort, a deep understanding of the phenomena and the ability to apply knowledge in practice. After working with the tasks and issues independently, the student has the opportunity to compare their results and conclusions with the answers given at the end of the topic. Problems, questions are given directly as a teacher while explaining the main principles and laws of relevant topics in physics.*

*Research and theoretical thinking characteristic of contemporary twenty-first century can not be limited empirical level of knowledge in physics (S. Honcharenko, O. Lyashenko, V. Razumovsky, A. Pavlenko). Physical science without slowing the pace of development of applied applications is becoming more and more theoretical. Theoretical physics knowledge level is not limited by law, although it gives them important. Because of the serial study in school physics course the student should get a system of physical knowledge that would meet (at least in a qualitative presentation) level coherent physical theory, natural science world view.*

*The theoretical results in physics - is the one that gained by logical operations or mathematical calculations. Constant work on physics theory, enriched the theoretical thinking. Theoretical thinking - a problem-solving based on existing knowledge in the form of concepts, reasoning and logical conclusions. All this comes with an internal speech, mentally.*

*A new generation of physics textbooks for secondary school by L. Blahodarenko, E. Korchak, O. Lyashenko, V. Savchenko, S. Honcharenko, A. Sergeev, V. Syrotyuk, B. Gogol, J. Levshenyuk, M. Shut, T. Zasyekina, D. Zasyekin and others, new generation collections of tasks using the 12-point scale assessment of student achievements, the transition to twelve year school put the task of building effective educational systems, finding ways to master them, the implementation of the development of educational materials. Development of such systems, including the main principles personality-developing training plays an important role in the content of education of student.*

**Key words:** *methods, theoretical thinking, electrostatics, Natural Sciences and Mathematics profile.*

*Стаття надійшла до редакції 15.04.2016*