

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

РОБОЧИЙ ЗОШИТ

з дисципліни «ФІЗИКА»
для слухачів довузівської підготовки
частина 2

Одеса - 2008

РОБОЧИЙ ЗОШИТ з дисципліни «ФІЗИКА» для слухачів довузівської підготовки частина 2

/ Расторгуєва Т.Є., Галич Є.А., Хохлова О. П. – Одеса: ОДЕКУ, 2008. - 113 с.

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Передмова.....	4
1 Основи молекулярно - кінетичної теорії будови речовин. Таблиця 1	5
Заняття 1. Молекулярно – кінетична теорія ідеальних газів.....	8
2 Закони ідеальних газів. Таблиця 2.....	13
Заняття 2. Рівняння стану ідеального газу. Газові закони.....	15
3 Основи термодинаміки. Перший закон термодинаміки. Таблиця 3....	21
Заняття 3. Внутрішня енергія. Робота. Теплота. Зміна внутрішньої енергії при здійсненні роботи.....	23
4 Закони термодинаміки. Фазові переходи. Таблиця 4.....	28
Заняття 4. Закон збереження енергії для теплових процесів. Другий закон термодинаміки.....	32
5 Властивості рідин і газів. Таблиця 5.....	36
Заняття 5. Властивості пари. Властивості рідин.....	38
6 Теплове розширення твердих і рідких тіл. Таблиця 6.....	44
Заняття 6. Лінійне і об'ємне розширення твердих і рідких тіл.....	44
7 Електростатика. Таблиця 7.....	49
Заняття 7. Закон Кулона. Напруженість поля. Потенціал.....	53
Заняття 8. Робота в електростатичному полі. Різниця потенціалів. Напруга.....	57
Заняття 9. Електроемність. Конденсатор. Енергія електричного поля.....	62
8 Закони постійного струму. Таблиця 8.....	67
Заняття 10. Постійний струм. Сила струму. Густина струму. Закон Ома для ділянки кола. Опір. Електропровідність.....	71
Заняття 11. Закон Ома для повного кола. З'єднання елементів. ЕРС. Робота і потужність струму.....	78
Заняття 12. Струми провідності. Струм в електролітах. Закон електролізу.....	82
9 Магнетизм. Таблиця 9.....	87
Заняття 13. Магнітне поле. Магнітна індукція.....	90
Заняття 14. Електромагнітна індукція. ЕРС індукції.....	96
Заняття 15. Самоіндукція. Індуктивність. Енергія магнітного поля струму.....	100
Перелік навчальної літератури.....	103
Додатки.....	104

ПЕРЕДМОВА

Запропонований навчальний посібник “Робочий зошит з фізики” є частиною методичного забезпечення, розробленого нами для тих школярів, які готуються до вступу в Одеський державний екологічний університет.

Якісна підготовка слухачів з фізики на факультеті довузівської підготовки за десятимісячний термін можлива лише при ретельному підборі задач для практичних занять, а також при використанні сучасних методик організації занять. У зв’язку з цим весь навчальний матеріал у “Робочому зошиті” (частина 2), що охоплює теми програм другого семестру, розбитий на п’ятнадцять занять, причому кожній темі, в залежності від її складності, відповідає від одного до трьох занять. Кожне заняття містить як аудиторну роботу, так і домашнє завдання. Домашні завдання до більшості занять аналогічні аудиторним, але трохи простіші від них, оскільки зошит розрахований на великий обсяг самостійної роботи учня.

Для виконання цих завдань потрібні теоретичні знання фізики в обсязі середньої школи.

Задачі в завданнях систематизовані з урахуванням методики їхнього рішення і відповідно до рівня складності.

Передкоюю темою, яка вивчається, приведені таблиці основних формул теми, що дозволяє слухачам вільно оперувати з цими формулами і запам’ятувати їх. У цих же таблицях представлені фізичні константи, та довідкові значення фізичних величин.

Після умови задач залишене поле для оформлення їх рішення. Щоб не вийти за межі цього поля, слухач повинен бути дуже уважним у зображені малюнків і запису рішень.

“Робочий зошит з фізики” в основному призначений для навчання під керівництвом викладача, але для добре підготовленого учня він буде корисним і при самостійній роботі.

1 ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ БУДОВИ РЕЧОВИНІ

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

I положення. Усі речовини складаються з молекул або інших структурних одиниць (атомів, іонів і електронів), розділених проміжками. Доказом дискретної побудови речовини є фотографії, одержані за допомогою іонного, електронного і тунельного мікроскопів. Про наявність проміжків між молекулами свідчить зміна об'єму твердих тіл і рідини при змінюванні їхньої температури.

II положення. Молекули або інші структурні частинки перебувають в неперервному хаотичному русі. Підтвердженням цього положення служать явища дифузії, броунівського руху, осмосу.

III положення. Молекули або атоми одночасно притягуються і відштовхуються, а рівнодіюча цих сил називається силою молекулярної взаємодії. Доказом є виникнення пружних сил при деформації тіл, виникнення сил поверхневого натягу.

Таблиця 1

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$	Відносною молекулярною масою (M_r) - називають відношення маси молекули (m_0) до $1/12$ маси атома Карбону (m_{0C}) (атомної одиниці маси, а.о.м.).	M_r - безрозмірна величина.
2		Один моль – кількість речовини, в якій міститься стільки ж молекул або атомів, скільки у Карбоні $^{12}_6 C$ масою 0,012 кг.	
3	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$	Стала Авогадро (N_A) – число атомів або молекул у 1 молі будь-якої речовини.	
4	$M = m_0 N_A$, $M = M_r \cdot 10^{-3}$	Молярна маса – маса одного моля речовини.	$[M] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

5	$m_0 = \frac{M}{N_A}$	Маса молекули (в кг), виражена через молярну масу.	$[m_0] = 1 \text{ кг.}$
6	$m = m_0 N$	Маса тіла (в кг), виражена через масу однієї молекули (m_0) і число молекул (N).	$[m] = 1 \text{ кг.}$
7	$v = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$	Кількість речовини (v) дорівнює відношенню числа молекул в даному тілі (N) до сталої Авогадро (N_A), тобто до числа молекул в 1 молі речовини, або відношенню маси тіла до молярної маси.	$[v] = 1 \text{ моль;}$ N - кількість молекул.
8	$V_M = \frac{V}{v}$	Згідно із законом Авогадро, 1 моль ідеального газу (V_M) займає за нормальних умов ($p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T = 273 \text{ К}$) об'єм, $V_M = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1}$.	V - об'єм газу; $[V] = 1 \text{ м}^3$.
9		Ідеальний газ – це газ, у якому середня відстань між молекулами набагато більша від розмірів молекул, і тому в ньому потенціальною енергією молекул нехтуєть.	
10	$\bar{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{N}$	Середній квадрат проекції швидкості.	$[\bar{v^2}] = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$ N - кількість молекул.
11	$\bar{v_{\kappa e}} = \sqrt{\bar{v^2}}$	Середня квадратична швидкість молекул ($\bar{v_{\kappa e}}$) – це корінь квадратний із середнього квадрату швидкості.	$[\bar{v}] = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$

12	$\overline{E_k} = \frac{E_{k1} + E_{k2} + \dots + E_{kn}}{N} = \\ = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$	Середня кінетична енергія поступального руху молекули.	$[\overline{E_k}] = 1 \text{ Дж.}$
13	$T = (273 + t) \text{ К}$	Температура – це величина, яка характеризує теплову рівновагу системи. У всіх частинах системи, що знаходяться в тепловій рівновазі, температура однаакова. Формула зв'язку термодинамічної температури (T) і температури за міжнародною шкалою температур. За міжнародною шкалою абсолютний нуль відповідає температурі - 273 °C.	$[t] = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Цельсій); $[T] = 1 \text{ K}$ (Кельвін).
14	$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$ - для одноатомних молекул; $\overline{E_k} = \frac{5}{2} kT$ - для двоатомних молекул. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	У молекулярно-кінетичної теорії температура – це величина, зумовлена середньою кінетичною енергією частинок, із яких складається система.	k - стала Больцмана.
15	$\overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \\ = \sqrt{\frac{2\overline{E_k}}{m_0}},$ $R = k \cdot N_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{К})}$	Середня швидкість теплового руху одноатомних молекул.	R - універсальна газова стала.
16	$n = \frac{N}{V} = \frac{vN_A}{V}$	Концентрація (n) дорівнює числу частинок в одиниці об'єму.	$[n] = 1 \text{ m}^{-3}$.

17	$p = nkT = \frac{N}{V}kT,$ $p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k = \frac{1}{3}m_0nv^2,$ $p = \frac{1}{3}\rho v^2$	Основне рівняння молекулярно - кінетичної теорії (МКТ): Закон Авогадро: у рівних об'ємах газів при однакових температурах і тиску міститься однакова кількість молекул.	$\rho = \frac{m}{V}$ - густина газу; m - маса газу; V - об'єм газу; $[\rho] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
----	--	--	---

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

Молярну масу речовини можна визначити за допомогою періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва. Обчислимо, наприклад, молярну масу вуглекислого газу, хімічна формула якого – CO_2 . За таблицею знайдемо, що відносна атомна маса вуглецю дорівнює 12, а кисню – 16. Отже, відносна молекулярна маса вуглекислого газу становить $M_r = 12 + 16 \cdot 2 = 44$, а його молярна маса – $M = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Заняття 1 **Молекулярно – кінетична теорія ідеальних газів**

Приклад 1. Визначити масу молекули аміаку (NH_3).

<u>Дано:</u>	<u>Розв'язання:</u>
NH_3	За хімічною формулою аміаку обчислимо відносну молекулярну масу аміаку: $M_r = 14 \text{ а.о.м.} + 3 \times 1 \text{ а.о.м.} = 17 \text{ а.о.м.}$
$m_0 - ?$	<u>I спосіб.</u> Оскільки встановлено, що 1 а.о.м. дорівнює $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг, тоді $m_0 = 17 \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 28 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$ <u>II спосіб.</u> За формулою молярної маси $M = m_0 \cdot N_A$. Звідси

$$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{17 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 28 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Відповідь: $m_0 = 28 \cdot 10^{-27}$ кг.

Приклад 2. Визначити число молекул в 1 мм³ води, масу молекул води, діаметр молекул води, якщо вважати умовно, що молекули води мають форму кулі та стикаються.

Дано:

$$V = 1 \text{ мм}^3$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$N - ? \quad m_0 - ? \quad d - ?$$

CI:

$$10^{-9} \text{ м}^3$$

Розв'язання:

Число N молекул, що містяться в масі тречовини, дорівнює числу Авогадро N_A , помноженого на число молей m/M :

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{\rho \cdot V}{M} N_A,$$

де ρ – густина речовини; V – об’єм, зйманий масою m цієї речовини. Масу m_0 однієї молекули можна визначити, розділивши масу одного моля на число Авогадро:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$

Оскільки молекули стикаються, можна вважати, що кожна молекула займає об’єм $V_0 = d^3$, де d – діаметр молекули. Звідси $d = \sqrt[3]{V_0}$, та оскільки $V_0 = V_m/N_A$, де $V_m = M/\rho$ – об’єм одного моля, то

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho \cdot N_A}}.$$

Обчислення:

$$N = \frac{10^3 \cdot 10^{-9} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{18 \cdot 10^{-3}} = 3,33 \cdot 10^{19},$$

$$m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23}} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ (кг)},$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}} = 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

Відповідь: $N = 3,33 \cdot 10^{19}$; $m_0 = 2,99 \cdot 10^{-26}$ кг; $d = 3,11 \cdot 10^{-10}$ м.

Приклад 3. Знайти відношення середніх квадратичних швидкостей молекул гелію (He) і азоту (N_2) при однакових температурах.

Дано:

$$M_{He} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\frac{\bar{v}_{He}}{\bar{v}_N} - ?$$

Розв'язання:

Середня кінетична енергія теплового руху молекули $\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ та пропорційна абсолютної температурі $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$. Якщо маса молекули

$$m_0 = \frac{M}{N_A}$$
, то для середньої квадратичної

швидкості молекули отримаємо наступний вираз $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$, а співвідношення цих швидкостей для молекул гелію і азоту буде дорівнювати $\frac{\bar{v}_{He}}{\bar{v}_N} = \sqrt{\frac{M_{N_2}}{M_{He}}}$.

Обчислення:

$$\frac{\bar{v}_{He}}{\bar{v}_N} = \sqrt{\frac{28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}} = 2,65.$$

Відповідь: $\bar{v}_{He} / \bar{v}_N = 2,65$.

Аудиторне заняття

1. Газ займає 4 л під тиском $5 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$. Визначити сумарну кінетичну енергію поступального руху молекул.

Дано:

CI:

Розв'язання:

Відповідь: $E_k = 3 \text{ Дж.}$

2. Концентрація молекул гелію, що міститься в балоні 10^{23} м^{-3} , а середня квадратична швидкість $8,5 \cdot 10^2 \text{ м/с}$. Чому дорівнює маса однієї молекули гелію? Обчисліти середній імпульс молекули. Визначити тиск газу в балоні.

Дано:

Розв'язання:

Відповідь: $m_0 = 6.64 \cdot 10^{-27}$ кг; $\rho = 5.65 \cdot 10^{-24} \frac{\text{кг}}{(\text{м} \cdot \text{с})}$; $p = 160$ Па.

Домашнє завдання

1. Визначити середню квадратичну швидкість молекул газу, густина якого при тиску 10^5 Па рівна $8,2 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.

Дано:

Розв'язання:

_____	<hr/>
-------	---

Відповідь: $\bar{v} = 1913$ м/с.

2. Після того, як у кімнаті протопили піч, температура піднялась з 15 до 27 °С. На скільки процентів зменшилось число молекул у кімнаті?

Дано:

CI:

Розв'язання:

_____	<hr/>
-------	---

Відповідь: $\frac{\Delta N}{N_1} \cdot 100\% = 4\%$

2 ЗАКОНИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Таблиця 2

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$pV = \frac{m}{M}RT$, $pV = vRT$	Рівняння Клапейрона – Менделєєва: рівняння стану ідеального газу зв'язує макроскопічні параметри (параметри стану) p , V , T , які характеризують стан тіла.	p – тиск; V - об'єм; T - температура; $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$ універсальна газова стала.
2	$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = const$, $m = \text{const}$	Рівняння стану ідеального газу (Рівняння Клапейрона), яке зв'язує макроскопічні стани системи даної маси газу при переході із стану 1 в стан 2.	
3		Газові закони визначають кількісну залежність між двома параметрами даної маси газу при фіксованому значенні третього параметру. Процеси, які протікають при незмінному значенні одного із параметрів, називаються ізопроцесами .	
4	$T = \text{const}$, $m = \text{const}$, $p_1V_1 = p_2V_2$, $pV = \text{const}$	Закон Бойля – Маріотта (ізотермічний процес): для даної маси газу добуток тиску газу на його об'єм є сталим, якщо температура газу не змінюється.	

5	$p = \text{const}$, $m = \text{const}$, $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, $\frac{V}{T} = \text{const}$	Закон Гей – Люссака (ізобарний процес): для даної маси газу відношення об'єму і температури постійне, якщо тиск газу не змінюється.	
6	$V = \text{const}$, $m = \text{const}$, $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, $\frac{p}{T} = \text{const}$	Закон Шарля (ізохорний процес): для даної маси газу відношення тиску до температури є постійним, якщо об'єм газу не змінюється.	
7	$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$	Закон Дальтона: тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків складових газу. Парціальний тиск – такий тиск, який створював би газ, займаючи даний об'єм сам.	p – тиск.

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

Якщо в задачі розглядається лише один стан газу і потрібно визначити певний параметр цього стану, то застосуйте рівняння Клапейрона – Менделєєва.

У випадку, коли в задачі розглядають два різних стани газу, встановіть, чи змінюється маса газу під час переходу із одного стану в інший. Якщо маса газу залишається сталою, використайте рівняння Клапейрона (рівняння об'єданого газового закону). Якщо за сталої маси в цьому процесі не змінюється також один з параметрів p , V або T (тиск, об'єм, температура), то застосуйте рівняння відповідного закону (Гей – Люссака, Шарля або Бойля – Маріотта). Якщо ж у двох станах маса газу різна, то для кожного з них запишіть рівняння Клапейрона – Менделєєва. Потім цю систему розв'яжіть відносно шуканої величини.

Заняття 2

Рівняння стану ідеального газу. Газові закони

Приклад 1. В кімнаті об'ємом 50 м^3 при тиску $0,99 \cdot 10^5 \text{ Па}$ температура повітря підвищилася від 10°C до 20°C . Визначити зміну маси повітря в кімнаті.

Дано:

$$V = 50 \text{ м}^3 = \text{const}$$

$$p = 0,99 \cdot 10^5 \text{ Па} = \text{const}$$

$$t_1 = 10^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 20^\circ\text{C},$$

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$$

$$\Delta m - ?$$

CI:

$$T_1 = 283 \text{ К}$$

$$T_2 = 293 \text{ К}$$

Розв'язання:

Скористаємося рівнянням

Менделєєва - Клапейрона для двох станів газу, з яких запишемо вирази для маси повітря:

$$pV = \frac{m_1}{M} RT_1 \Rightarrow m_1 = \frac{pVM}{RT_1},$$

$$pV = \frac{m_2}{M} RT_2 \Rightarrow m_2 = \frac{pVM}{RT_2}.$$

Тоді:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{pVM}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = \frac{pVM}{RT_1 T_2} (T_1 - T_2).$$

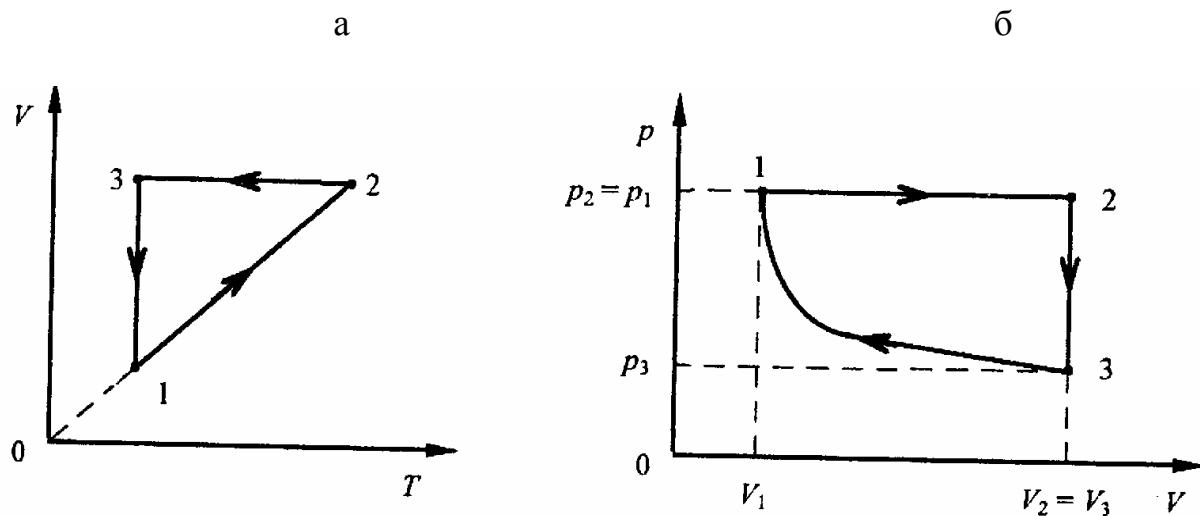
Обчислення:

$$\Delta m = \frac{0,99 \cdot 10^5 \cdot 50 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 283 \cdot 293} \cdot (283 - 293) = -2,1 \text{ кг.}$$

Знак “мінус” указує на те, що $m_2 < m_1$, тобто частина повітря вийшла з кімнати, оскільки об'єм повітря збільшився при нагріванні, а об'єм кімнати постійний.

Відповідь: $\Delta m = -2,1 \text{ кг.}$

Приклад 2. Деяка кількість ідеального газу скоює замкнений процес 1-2-3-1, який був зображенний на графіку залежності об'єму V від температури T (рис. а). Зобразите цей процес в координатних осіх p , V .



Розв'язання:

Унаслідок того, що продовження прямої 1-2 проходить через початок координат, можна затверджувати, що ділянка 1-2 є ізобарою ($p_1 = p_2$). В координатних осіх p , V ця ізобара зображається відрізком прямої, перпендикулярної до вісі p (рис. б). Кінці цього відрізка (точки 1 та 2) визначаються відповідними об'ємами газу ($V_2 > V_1$).

Ділянка 2-3 є ізохорою ($V_2 = V_3$). Із зменшенням температури газу ($T_3 < T_2$) тиск газу падає ($p_3 < p_2$) при незмінному об'ємі. В координатних осіх p , V ця ізохора зображається відрізком прямої, перпендикулярної до вісі p (рис. б). Кінці цього відрізка (точки 2 та 3) визначаються відповідними значеннями тиску газу ($p_3 < p_2$).

Ділянка 3-1 – це ізотерма ($T_1 = T_3$). В координатних осіх p , V (рис. б) ізотерма являє собою криву (гіперболу), оскільки описує обернено пропорційну залежність (за законом Бойля – Маріотта):

$$p_1 V_1 = p_3 V_3 \text{ або } \frac{p_1}{p_3} = \frac{V_3}{V_1}.$$

Приклад 3. У циліндричній посудині з площею основи 250 см^2 міститься 10 г азоту, стисненого поршнем, на якому лежить гиря масою 12,5 кг. Визначити роботу газу при його нагріванні від 25°C до 625°C . Атмосферний тиск 760 мм рт. ст. Чи залежить робота від маси гирі?

Дано:

$$S = 250 \text{ см}^2$$

$$m = 10 \text{ г}$$

$$m_1 = 12,5 \text{ кг}$$

$$t_1 = 25^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 625^\circ\text{C}$$

$$p_0 = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

$$M(N_2) = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$A - ?$$

CI:

$$S = 250 \cdot 0,0001 \text{ м}^2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$m = 10 \cdot 0,001 \text{ кг} = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$m_1 = 12,5 \text{ кг}$$

$$T_1 = (273 + 25) \text{ К} = 298 \text{ К}$$

$$T_2 = (273 + 625) \text{ К} = 898 \text{ К}$$

$$p_0 = 760 \cdot 133,3 \text{ Па} = 10^5 \text{ Па}$$

$$M(N_2) = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

Розв'язання:

$A = p\Delta V$, оскільки процес ізобарний.

$$\text{Знайдемо } p: p = p_{atm} + \frac{m_1 g}{S}.$$

За рівнянням Клапейрона – Менделєєва визначимо V_1 , V_2 , $V_2 - V_1$:

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1 \Rightarrow V_1 = \frac{mRT_1}{Mp}, \quad p_2 V_2 = \frac{m}{M} RT_2 \Rightarrow V_2 = \frac{mRT_2}{Mp}.$$

$$\text{Тоді } A = \frac{mR}{Mp}(T_2 - T_1)p = \frac{mR}{M}(T_2 - T_1), \quad A = \frac{mR}{M}(T_2 - T_1).$$

Робота не залежить від маси гирі і від площини посудини.

Обчислення:

$$[A] = \frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} = \text{Дж}; \quad \{A\} = \frac{10^{-2} \cdot 8,31 \cdot (898 - 298)}{28 \cdot 10^{-3}} = 1780 \text{ Дж}.$$

Відповідь: $A = 1,78 \text{ кДж}$.

Аудиторне заняття

1. Балон розділили перегородкою на дві частини. В першій частині, що має об'єм V_1 , міститься ідеальний газ, тиск якого дорівнює p_1 , а температура - T_1 . У другій частині, що має об'єм V_2 , - такий самий газ, тиск якого p_2 , а температура - T_2 . Який тиск буде в балоні, якщо забрати перегородку, а газ довести до температури T ?

Дано:

Розв'язання:

$$\text{Відповідь: } p = \left(\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} \right) \frac{T}{V_1 + V_2}.$$

2. Ідеальний газ, що знаходитьться при температурі 127 °C и тиску $4 \cdot 10^5$ Па, займає спочатку об'єм 2 л. Цей газ ізотермічно стискають, а потім ізобарична охолоджують до температури -73 °C і далі ізотермічно доводять його об'єм до 1 л. Яка кількість речовини знаходиться в посудині? Скільки молекул містить даний газ? Визначити сталий остаточний тиск газу в посудині.

Дано:

CI:

Розв'язання:

$$\text{Відповідь: } v = 0,24 \text{ моль; } N = 1,44 \cdot 10^{23}; p = 4 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Домашнє завдання

1. У балоні знаходиться газ при температурі 27°C і тиску $2 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Визначити тиск газу, якщо з балона вийшло 30% від всієї маси газу і температура при цьому знизилася до 12°C .

Дано: CI: Розв'язання:

	<hr/>	<hr/>
--	---	---

Відповідь: $p_2 = 13,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

2. Газ при температурі 182°C займає об'єм V_0 . До якої температури слід охолодити газ при постійному тиску, щоб його об'єм став рівним $2/5 V_0$?

Дано: CI: Розв'язання:

	<hr/>	<hr/>
--	---	---

Відповідь: $T_2 = 182 \text{ К}$.

3. При 10°C газ знаходиться під тиском $5 \cdot 10^5$ Па. Який буде тиск газу при 65°C , якщо його об'єм не змінюється?

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $p_2 \approx 6 \cdot 10^5$ Па.

4. Для наповнення балона вуглекислим газом при 0°C і тиску $40 \cdot 10^5$ Па було потрібно 7,88 кг вуглекислого газу. Визначити об'єм балона, знаючи, що густина вуглекислого газу за нормальних умов рівна $1,97 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $V_1 \approx 0,1 \text{ м}^3$.

3 ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Внутрішня енергія змінюється при:

- здійснені роботи над тілом чи самим тілом;
- теплопередачі.

Таблиця 3а

№ п/п	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$\Delta U = Q + A$	<p>Закон збереження і перетворення енергії, поширений на теплові явища, називається першим законом термодинаміки:</p> <p>Зміна внутрішньої енергії ΔU при переході її із одного стану в інший дорівнює сумі роботи <u>зовнішніх сил</u> A і кількості теплоти Q, переданої системі.</p>	A – робота зовнішніх сил. $[U] = 1 \text{ Дж}$; $[Q] = 1 \text{ Дж}$; $[A] = 1 \text{ Дж}$.
2	$Q = \Delta U + A'$	<p>Кількість теплоти Q, передана системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії ΔU і на здійснення системою <u>роботи над зовнішніми тілами</u> A'.</p>	A' - робота системи над зовнішніми силами ($A' = -A$).
3	$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT$	<p>Внутрішня енергія ідеального газу обумовлюється лише кінетичною енергією руху молекул (E_k), а потенціальною енергією (E_n) їх взаємодії можна знехтувати.</p>	i – число ступенів свободи молекул (для одноатомного газу $i = 3$, двоатомного $i = 5$, а для трьох- і більше атомного – $i = 6$).
4		<p>Роботу в термодинаміці може здійснювати лише газ, який значно змінює свій об’єм.</p>	

5	$A' = p(V_2 - V_1)$, $A' = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$	Робота ідеального газу при ізобарному ($p = \text{const}$) процесі.	
6	$A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$	Робота ідеального газу при ізотермічному процесі ($T = \text{const}$).	
7	$A' = 0$	Робота ідеального газу при ізохоричному ($V = \text{const}$) процесі.	
8	$Q = 0$	Адіабатичний процес – процес у теплоізольованій системі.	
9	$pV^\nu = \text{const}$	Рівняння Пуассона для адіабатичного процесу в ідеальному газі.	
10	$\nu = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+1}{i}$	Відношення молярних (чи питомих) теплоємностей газу при сталому тиску і об'ємі.	

Таблиця 3б

Ізотермічний $T = \text{const}$ $m = \text{const}$	Ізохоричний $V = \text{const}$ $m = \text{const}$	Ізобаричний $p = \text{const}$ $m = \text{const}$	Адіабатичний $Q = 0$
$\Delta T = 0$	$\Delta V = 0$	$\Delta p = 0$	$Q = 0$
$\Delta U = 0$	$A' = 0$	$Q = \Delta U + A'$	$\Delta U + A' = 0$
$Q = A'$	$Q = \Delta U$		$\Delta U = -A'$
			$\Delta U = A'$

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

Якщо внутрішня енергія системи (U) змінюється в результаті виконання механічної роботи (A') над зовнішніми тілами, то складіть рівняння таким чином:

$$-\eta\Delta U = A',$$

де η - ККД процесу.

Якщо внутрішня енергія системи (U) збільшується за рахунок того, що зовнішні тіла виконують над нею механічну роботу (A), тоді $\Delta U = \eta A$.

Заняття 3
Внутрішня енергія. Робота. Термодинаміка.
Зміна внутрішньої енергії при здійсненні роботи

Приклад 1. Об'єм 160 г водню, температура якого 27 °C, при ізобарному нагріванні збільшився удвічі. Визначити роботу газу при розширенні, кількість теплоти, що пішла на його нагрівання, зміну внутрішньої енергії.

Дано:

$$t_1 = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m = 160 \text{ г}$$

$$M(H_2) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p = \text{const}$$

$$V_2 = 2V_1$$

$$i = 5$$

$$A' - ? \Delta U - ? Q - ?$$

CI:

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$m = 0,16 \text{ кг}$$

$$M(H_2) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p = \text{const}$$

$$V_2 = 2V_1$$

Розв'язання:

Кінцеву температуру T_2 визначимо за законом Гей – Люссака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad T_2 = \frac{V_2 T_1}{V_1} = \frac{2V_1 T_1}{V_1} = 2T_1.$$

Зміна температури ΔT дорівнює:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 2T_1 - T_1 = T_1.$$

При ізобарному нагріванні робота газу дорівнює

$$A' = p\Delta V.$$

За рівнянням Клапейрона – Менделєєва:

$$p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T,$$

отже, робота газу при ізобарному процесі:

$$A' = \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (1)$$

Зміна внутрішньої енергії двохатомного ідеального газу дорівнює:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (2)$$

За першим законом термодинаміки визначимо кількість теплоти:

$$Q = \Delta U + A'.$$

Тоді:

$$Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T + \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{7}{2} \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (3)$$

Підставимо значення ΔT у формули (1), (2), (3) і отримаємо:

$$A' = \frac{m}{M} RT_1, \quad \Delta U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT_1, \quad Q = \frac{7}{2} \frac{m}{M} RT_1.$$

Обчислення:

$$[A'] = [\Delta U] = [Q] = \frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} = \text{Дж};$$

$$\{A'\} = \frac{0,16 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 10^{-3}} = 199440;$$

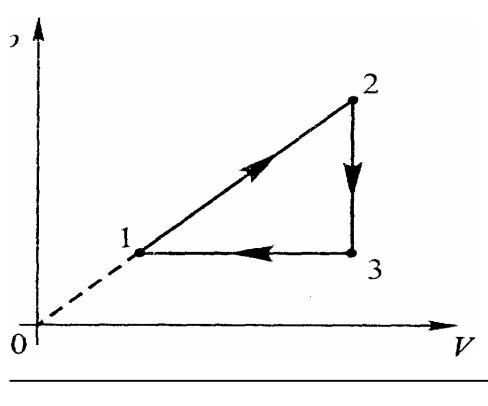
$$\{\Delta U\} = \frac{5 \cdot 0,16 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 498600;$$

$$\{Q\} = \frac{7 \cdot 0,16 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 698040.$$

Відповідь: $A' = 199,4 \text{ кДж}$; $\Delta U = 498,6 \text{ кДж}$; $Q = 698,04 \text{ кДж}$.

Приклад 2. Термодинамічний процес, графік якого зображенний на рис., здійснює ідеальний газ, маса якого залишається сталою. Встановити, як змінювалася температура газу на відрізках 1-2, 2-3 і 3-1. З'ясувати, на яких відрізках газ отримував певну кількість теплоти, а на яких віддавав.

Дано:



Розв'язання:

Згідно з рис., на відрізку 1-2 тиск газу змінювався прямо пропорційно об'єму:
 $p = aV$, де $a = \text{const}$ - коефіцієнт пропорційності.

На основі рівняння Клапейрона - Менделєєва отримаємо:

$$aV^2 = \frac{m}{M} RT.$$

Звідси:

$$T = \frac{aM}{mR} V^2.$$

Таким чином, зі збільшенням об'єму газу V збільшувалася його температура і внутрішня енергія, тобто $\Delta U > 0$. При цьому газ

розширювався і виконував додатну роботу $A > 0$. Згідно з першим законом термодинаміки, $Q_{1-2} = \Delta U + A$. Отже, $Q_{1-2} > 0$, тобто на відрізку 1-2 газу було надано певну кількість теплоти.

На відрізку 2-3 графіка зображеного ізохоричний процес ($V = \text{const}$).

Згідно із законом Шарля, маємо:

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}.$$

Звідси:

$$T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2}.$$

Оскільки $p_3 < p_2$, то $T_3 < T_2$ і внутрішня енергія газу на цьому відрізку зменшувалась ($\Delta U < 0$). При ізохоричному процесі робота газу $A = 0$. Тому $Q_{2-3} < 0$, тобто газ віддав певну кількість теплоти.

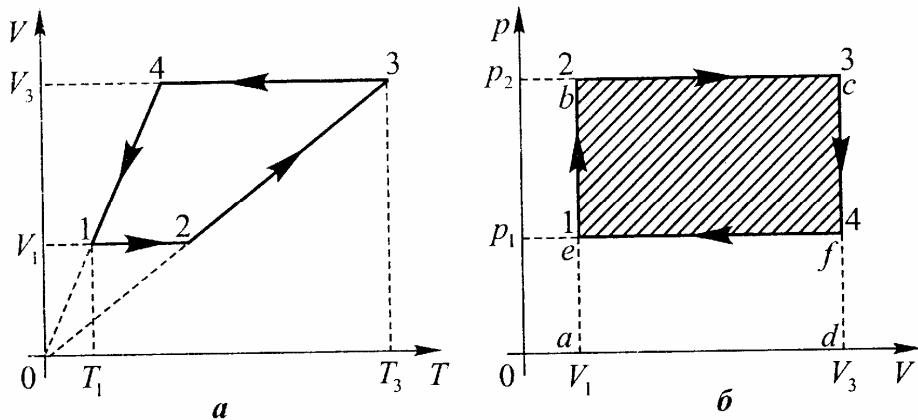
Перехід газу зі стану 3 у стан 1 відбувався при сталому тиску ($V = \text{const}$). За законом Гей - Люссака, маємо:

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_1}{T_1}.$$

Звідси:

$$T_1 = T_3 \frac{V_1}{V_3}.$$

Об'єм газу зменшувався, а тому $A < 0$ і $T_1 < T_3$. Таким чином, $\Delta U < 0$. На основі першого закону термодинаміки доходимо висновку: $Q_{3-1} < 0$, тобто на ділянці 3-1 газ віддав певну кількість теплоти.



Аудиторне заняття

1. У вертикально розташованому циліндрі місткістю $V = 200 \text{ см}^3$ під важким поршнем знаходиться газ при температурі $T = 300 \text{ К}$. Маса поршня $m = 50 \text{ кг}$, його площа $S = 50 \text{ см}^2$. Для підвищення температури газу $\Delta T = 100 \text{ К}$ йому надали кількість теплоти $Q = 46,5 \text{ Дж}$. Визначити зміну внутрішньої енергії газу. Атмосферний тиск $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Тертя не враховувати. Вважати, що прискорення вільного падіння $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $\Delta U = 33 \text{ Дж}$.

2. Визначити зміну внутрішньої енергії $v = 0,5$ моль одноатомного ідеального газу в результаті його нагрівання при сталому тиску від температури $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 320 \text{ К}$, якщо газу було надано кількість теплоти $Q = 290 \text{ Дж}$. Універсальна газова стала $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $\Delta U = 2 \cdot 10^2$ Дж.

Домашнє завдання

1. Ідеальний газ у кількості $v = 0,5$ моль, що мав початкову температуру $T = 300$ К, ізобарно розширився, виконавши роботу $A = 12,5 \cdot 10^3$ Дж. У скільки разів при цьому збільшився об'єм газу?

Дано:



CI:

Розв'язання:

Відповідь: $\frac{V_2}{V_1} = 2$.

2. Гелій масою $m = 10$ г ізобарно нагріли на $\Delta T = 100$ К. Визначити кількість теплоти, передану газу, зміну його внутрішньої енергії та роботу, яку виконав газ при розширенні. Молярна маса гелію $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Універсальна газова стала $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $\Delta U = 3 \cdot 10^3$ Дж; $A = 2 \cdot 10^3$ Дж; $Q = 5 \cdot 10^3$ Дж.

4 ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ. ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ

Теплопередачею або **теплообміном** називається процес передачі енергії від одного тіла до іншого без здійснення роботи.

Існує три способи **теплопередачі**:

- 1) теплопровідність;
- 2) конвекція;
- 3) випромінювання.

Таблиця 4

№ п/п	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1		Та частина внутрішньої енергії, яку тіло втрачає чи отримує при теплопередачі, називається кількістю теплоти (Q).	$[Q] = 1 \text{ Дж.}$
2	$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0,$ $\sum Q_{\text{одерж}} = \sum Q_{\text{відд}}$	Закон збереження і перетворення енергії: в замкнuttй системі повна енергія є сталою величиною. Рівняння теплового балансу.	$\sum Q_{\text{одерж}}, \sum Q_{\text{відд}}$ - сумарна кількість теплоти, одержана та віддана тілом при теплообміні.
3	$c = \frac{Q}{m\Delta T}$	Питома теплоємність речовини (c) – це величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, яку отримує або віддає 1 кг речовини при зміні її температури на 1 К.	$[c] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.
4	$C = cm$	Теплоємність тіла масою m .	$[C] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.
5	$Q = cm(t_k - t_h),$ $Q = C(t_k - t_h),$ $Q = cm(t_h - t_k),$ $Q = C(t_h - t_k)$	Кількість теплоти: - яка необхідна для нагрівання тіла ; - яка виділиться при охолодженні тіла.	t_h - початкова температура; t_k - кінцева температура;
6	$C_v = \frac{iR}{2},$ $c_v = \frac{C_v}{M} = \frac{iR}{2M}$	Молярна теплоємність (C_v) і питома теплоємність (c_v) при постійному об'ємі.	M – молярна маса речовини; R - універсальна газова стала.
7	$C_p = C_v + R = \frac{(i+2)}{2}R$	Молярна теплоємність (C_p).	$[C_v] = [C_p] =$ $= 1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

	$c_p = \frac{(i+2)R}{2M}$	Питома теплоємність (c_p) при постійному тиску.	$[c_v] = [c_p] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.
	<p><u>Другий закон термодинаміки:</u> неможливий процес, єдиним результатом якого є передача енергії в формі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого (формулювання Клаузіса).</p>		
8	$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$	Термодинамічний (термічний) ККД теплового двигуна.	Q_1, Q_2 - кількість теплоти відповідно одержана двигуном від нагрівника і віддана холодильнику.
9	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$	Теорема Карно: термічний ККД ідеальної теплової машини не залежить від природи робочого тіла і є лише функцією температур нагрівача (T_1) і холодильника (T_2).	
10	$A_{кор} < Q_1 - Q_2$	ККД реальних теплових машин менший від ККД ідеальної машини.	$[A] = 1 \text{ Дж.}$
11	$\eta_{екон} = \frac{A_{кор}}{qm}$	Економічний ККД теплової машини – це відношення корисної роботи двигуна ($A_{кор} = N \cdot t$) до кількості теплоти, виділеної при згорянні палива.	
12	$k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$	Холодильний коефіцієнт.	Q_1, Q_2 - кількість теплоти відповідно передана в оточуюче середовище і забрана у холодильної камери.

13	$Q_{\text{фаз}} = q_{\text{фаз}} m$	Теплота фазових переходів – кількість теплоти, яка потрібна для перетворення маси (m) речовини з одного агрегатного стану у другий.	$[Q_{\text{фаз}}] = 1 \text{ Дж.}$
14	$q_{\text{фаз}} = \frac{Q}{m}$	Питома теплота фазового перетворення.	$[q] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$
15	$\lambda = \frac{Q}{m}$	Питома теплота плавлення (кристалізації) (λ).	$[\lambda] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$
16	$r = \frac{Q}{m}$	Питома теплота пароутворення (конденсації) (r).	$[r] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$
17	$q = \frac{Q}{m}$	Питомою теплотою згоряння палива називається величина, яка вимірюється кількістю теплоти, що виділяється при повному згорянні одного кілограма палива.	$[q] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$
18	$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{qm}$	Коефіцієнт корисної дії (ККД) – нагрівача (η), який визначає, яка частина, виділеної при нагріванні, енергії використовується з користю.	

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

Якщо в задачі розглядається процес передачі енергії від одних тіл до інших без виконання роботи (теплообміну), на основі закону збереження і перетворення енергії складіть рівняння теплового балансу:

$$\sum Q_{\text{одерж}} = \sum Q_{\text{відд}},$$

де $\sum Q_{\text{відд}}$ – кількість теплоти, яку віддали одні тіла; $\sum Q_{\text{одерж}}$ - кількість теплоти, яку одержали інші тіла.

Якщо задано ККД (η) теплообміну, тоді

$$Q_{\text{одерж}} = \eta \cdot Q_{\text{відд}}.$$

У всіх фазових перетвореннях здійснюється теплообмін між нагрівачем та системою. Тому в загальному вигляді сумарна кількість теплоти ($\sum Q$) йде на нагрівання системи та на фазові перетворення:

$$\sum Q = c_1 \cdot m \cdot \Delta T_1 + \lambda \cdot m + c_2 \cdot m \cdot \Delta T_2 + r \cdot m + c_3 \cdot m \cdot \Delta T_3.$$

нагрівання плавлення нагрівання кипіння нагрівання
 (твердого тіла) (твердого тіла) (рідини) (пароутворення) (пари)

При цьому маса речовини при нагріванні та при фазових перетвореннях не змінюється:

$$m_{mb} = m_{pidk} = m_{nap} = m.$$

Заняття 4

Закон збереження енергії для теплових процесів. Другий закон термодинаміки

Приклад 1. У калориметрі m_1 , питома теплоємність якого c_1 , знаходиться вода масою m_2 , нагріта до температури t_1 . В калориметр опускають суміш мідних і алюмінієвих ошурків масою m , які мають температуру t_2 . В результаті температура води підвищується до θ . Визначити масу мідних і алюмінієвих ошурків.

Дано:

$$\begin{aligned} m_k &= m_1 \\ c_k &= c_1 \\ t_{pk} &= t_1 \\ m_b &= m_2 \\ c_b &= c_2 \\ t_{pb} &= t_1 \\ m_{суміш} &= m = m_3 + m_4 \\ c_{A1} &= c_3 \\ c_{Cu} &= c_4 \\ t_{п.A1} &= t_{п.Cu} = t_2 \end{aligned}$$

$m_3 - ?$

$m_4 - ?$

Розв'язання:

Закон збереження енергії для теплових процесів має вигляд: $Q_{\text{одерж}} = Q_{\text{відд}}$,
 $Q_{\text{одерж}} = Q_1 + Q_2 = c_k m_k (\theta - t_1) + c_b m_b (\theta - t_1)$,
 $Q_{\text{одерж}} = c_1 m_1 (\theta - t_1) + c_2 m_2 (\theta - t_1)$,
 $Q_{\text{відд}} = m_3 c_3 (t_2 - \theta) + m_4 c_4 (t_2 - \theta)$.

Прирівняємо $Q_{\text{одерж}}$ і $Q_{\text{відд}}$:
 $(\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2) = (t_2 - \theta) \cdot (c_3 m_3 + c_4 m_4)$.
 Оскільки $m = m_3 + m_4$, то отримуємо два

рівняння з двома невідомими. Зайдемо m_4 і m_3 :

$$m_4 = \frac{(\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2) - c_3 m(t_2 - \theta)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)},$$

$$m_3 = m - m_4 = \frac{m(t_2 - \theta) \cdot c_4 - (\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)}.$$

Відповідь: $m_3 = \frac{m(t_2 - \theta) \cdot c_4 - (\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)}$;

$$m_4 = \frac{(\theta - t_1) \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2) - c_3 m(t_2 - \theta)}{(t_2 - \theta) \cdot (c_4 - c_3)}.$$

Приклад 2. На електроплитці з ККД 78% нагрівалась мідна кастрюля з водою. Маса каструлі 800 г, маса води 2,1 кг. Яка потужність електроплитки, якщо процес нагрівання до кипіння тривав 40 хв і при цьому 15% води випарувалось? Початкова температура води 15 °C.

<u>Дано:</u>	<u>CI:</u>	<u>Розв'язання:</u>
$\eta = 78\%$		$N_{затр} = Q_{затр}/\tau \Rightarrow Q_{затр} = N_{затр} \cdot \tau$.
$m_1 = 800 \text{ г}$	$m_1 = 0,8 \text{ кг}$	ККД електроплитки дорівнює:
$c_1 = c_{Cu} = 380 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$		$\eta = \frac{Q_{корисн}}{Q_{затр}} \cdot 100\%$,
$m_2 = 2,1 \text{ кг}$		
$c_2 = c_B = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$		$Q_{корисн} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = c_1 m_1 (\theta - t_n) + c_2 m_2 (\theta - t_n) + r \cdot m_n$.
$\tau = 400 \text{ хв}$	$\tau = 2400 \text{ с}$	Підставивши вирази, отримаємо
$t_{n,1} = t_{n,2} = t_n = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$\eta = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_n) + c_2 m_2 (\theta - t_n) + r m_n}{N_{затр} \cdot \tau} 100\%$
$m_3 = m_n = 0,15 \text{ кг}$		
$r_B = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж /кг}$		
$N_{затр} - ?$		Звідси:

$$N_{затр} = \frac{c_1 m_1 (\theta - t_n) + c_2 m_2 (\theta - t_n) + L m_n}{\eta \cdot \tau} 100\%.$$

Обчислення:

$$\begin{aligned} [N_{затр}] &= \frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}; \\ \{N_{затр}\} &= \frac{380 \cdot 0,8 \cdot (100 - 15) \cdot 100}{78 \cdot 2400} + \frac{4200 \cdot 2,1 \cdot (100 - 15) \cdot 100}{78 \cdot 2400} + \\ &+ \frac{2,3 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 2,1 \cdot 100}{78 \cdot 2400} \approx 800. \end{aligned}$$

Відповідь: $N_{затр} \approx 800 \text{ Вт.}$

Аудиторне заняття

- Свинцева куля, що летить із швидкістю v_0 пробивши дошку, зменшує свою швидкість до v . Початкова температура t . Визначити, яка частина кулі розплавиться, якщо вважати, що на нагрівання пішла k – та частина втраченої кінетичної енергії ($k < 1$).

Дано:

Розв'язання:

----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----	

Відповідь:
$$\frac{m_{pid}}{m} = \frac{k(v^2 - v_0^2) - 2c(t_{nl} - t)}{2\lambda}$$
.

2. Двигун внутрішнього згорання має ККД 28% при температурі згорання палива 927 °C і температурі відхідних газів 447 °C. На скільки ККД двигуна менший від ККД ідеальної теплової машини?

Дано:

CI:

Розв'язання:

----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----	

Відповідь: ККД двигуна менший від ККД ідеальної теплової машини на 12%.

Домашнє завдання

1. У латунний калориметр масою $m_1 = 100$ г, в якому міститься $m_2 = 250$ г води при температурі $T_1 = 280$ К, опустили тіло масою $m = 200$ г, нагріте до температури $T_2 = 373$ К. У результаті теплообміну встановилася температура $T = 293$ К. Визначити питому теплоємність речовини, з якої виготовлено тіло. Питома теплоємність латуні $c_1 = 380$ Дж / (кг · К), води $c_2 = 4190$ Дж / (кг · К).

Дано:

Cl:

Розв'язання:

Відповідь: $c = 882 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

2. Автомобіль витрачає $m = 5,67$ кг бензину на $S = 50$ км шляху. Визначити середню потужність, яку розвиває при цьому двигун автомобіля, якщо середня швидкість руху $v_{cp} = 80$ км/год і ККД двигуна $\eta = 22\%$. Питома теплота згорання бензину $q = 46 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Дано:

Cl:

Розв'язання:

Відповідь: $N = 2,6 \cdot 10^4$ Вт.

5 ВЗАЄМНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ РІДИН І ГАЗІВ

Пара – це газоподібний стан речовини, в який можуть переходити як рідини (випарування), так і тверді тіла (сублімація).

Випарування – процес перетворення рідини в пару при будь якій температурі.

Конденсація – процес перетворення пари в рідину.

Насичена пара – пара, яка знаходиться в динамічній (рухомій) рівновазі з своєю рідиною.

Абсолютна вологість – це парціальний тиск водяної пари (p), наявної в повітрі при даній температурі, або густина водяної пари (ρ).

Точкаю роси – це температура, при якій дана водяна пара стає насиченою (конденсується).

Таблиця 5

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$\varphi = \frac{p}{p_h} \cdot 100\%$, $\varphi = \frac{\rho}{\rho_h} \cdot 100\%$	Відносна вологість – це відношення абсолютної вологості до густини (ρ_h) або тиску (p_h) насиченої пари при даній температурі.	
2		Кипіння – пароутворення, яке відбувається як у всьому об’ємі рідини, так і з її поверхні при	

	$p_h = p_{\text{зовн}} = p_{\text{атм}}$, $p_{h100} = p_{\text{атм}} \approx 10^5 \text{ Па}$	постійній температурі. Рідина кипить, коли тиск насиченої пари дорівнює зовнішньому тиску на рідину. Температура кипіння води при нормальному атмосферному тиску: $t = 100^\circ\text{C}$.	
3	$\sigma = \frac{F_h}{l_{\text{межі}}}$	Поверхневим натягом називається відношення модуля сили поверхневого натягу (F_h) до довжини межі поверхні плівки ($l_{\text{межі}}$).	$[\sigma] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.
4	$\sigma = \frac{m_k g}{l}$	Величина поверхневого натягу, визначається ще методом відриву крапель.	m_k - маса краплі; g – прискорення вільного падіння; l - довжина межі поверхневого шару.
5	$\Pi = \sigma \cdot S$	Енергія поверхневого шару рідини площею S .	
6	$A = \sigma \cdot \Delta S = \Delta \Pi$	Робота при зміні площині поверхневого шару плівки.	
7	$h = \frac{2\sigma \cos \Theta}{\rho g R}$	Висота підняття (або опускання) рідини у капілярі.	Θ - крайній кут; g - прискорення вільного падіння; R - радіус капіляра.

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

При розв'язанні задач із зазначеними параметрами пари і вологості повітря використовують закони ідеального газу (Гей – Люссака, Шарля, Бойля – Маріотта, Дальтона), рівняння Клапейрона, Клапейрона – Менделєєва. Проте слід звернути увагу на такі особливості:

а) параметри двох різних станів насиченої пари не пов'язані між собою об'єднаним газовим законом, оскільки в цих станах насичена пара має різну масу;

б) якщо відома температура насыченої пари, можна, скориставшись відповідними таблицями, знайти її густину та тиск;

в) за відомою температурою насыченої пари (T_h) і температурою точки роси (T_p), можна за допомогою таблиць знайти абсолютну вологість повітря, оскільки за температурою T_p ця пара стає насыченою;

г) параметри кожного стану насыченої пари пов'язані між собою рівнянням Клапейрона – Менделєєва.

У задачах на застосування сил поверхневого натягу необхідно врахувати, що вони спрямовані вздовж поверхні рідини перпендикулярно до лінії, яка обмежує цю поверхню, і намагаються її зменшити. В капілярах рівень змочуючих рідин піднімається, а незмочуючих – опускається.

Заняття 5 *Властивості пари. Властивості рідин*

Приклад 1. Відносна вологість повітря увечері при 14 °C дорівнює 80%. Вночі температура повітря знизилась до 6 °C і випала роса. Скільки водяної пари сконденсувалось з 1 м³ повітря?

Дано:

$$V = 1 \text{ м}^3$$

$$t_1 = 14 \text{ °C}$$

$$\varphi_1 = 80\%$$

$$t_2 = 6 \text{ °C}$$

$$\rho_{\text{H}14} = 12,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{H}6} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$$

$$m_{\text{в}} - ?$$

Розв'язання:

При конденсації водяної пари маса води визначається як різниця маси пари на початку процесу охолодження і в кінці:

$$m_{\text{в}} = m_{\text{п1}} - m_{\text{п2}}$$

Масу пари можна знайти через густину і об'єм:

$$m_{\text{п1}} = \rho_{\text{п1}} V,$$

$$m_{\text{п2}} = \rho_{\text{п2}} V.$$

Оскільки пара стала насыченою, то $\rho_{\text{п2}} = \rho_{\text{H}6}$. Значить,

$$m_{\text{п2}} = \rho_{\text{H}6} V.$$

Тоді маса води дорівнює:

$$m_{\text{в}} = V(\rho_{\text{п1}} - \rho_{\text{H}6}).$$

Визначимо $\rho_{\text{п1}}$ за формулою відносної вологості повітря:

$$\varphi_1 = \frac{\rho_{n1}}{\rho_{H14}} \cdot 100\%,$$

$$\rho_{n1} = \frac{\varphi_1 \rho_{H14}}{100\%}.$$

Тоді масу води можна розрахувати за такою формулою:

$$m_B = V \left(\frac{\varphi_1 \rho_{H14}}{100\%} - \rho_{H6} \right).$$

Обчислення:

$$[m_B] = M^3 \left(\frac{\% \cdot \text{кг}}{M^3 \cdot \%} - \frac{\text{кг}}{M^3} \right) = \text{кг};$$

$$\{m_B\} = 1 \cdot \left(\frac{80 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3}}{100} - 7,3 \cdot 10^{-3} \right) = 2,38 \cdot 10^{-3}.$$

Відповідь: $m_B = 2,38 \cdot 10^{-3}$ кг.

Приклад 2. Яка кількість теплоти виділиться в навколошнє середовище, якщо при злитті крапельок діаметром 1 мкм вийде 1 кг чистої води при тій же самій температурі? На скільки градусів нагрілась би вода, якби не було тепловіддачі?

<u>Дано:</u>	<u>CI:</u>
$m = 1 \text{ кг}$	$m = 1 \text{ кг}$
$\rho_B = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	$\rho_B = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$
$c_B = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$c_B = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
$d = 1 \text{ мкм}$	$d = 10^{-6} \text{ м}$
$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н}/\text{м}$	$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н}/\text{м}$

$\Delta T - ?$

Розв'язання:
 Краплі, порівняно з водою, які містяться в одній посудині, мають значно більшу поверхневу енергію. Ця надлишкова енергія

$$\Pi = \sigma_B \Delta S. \quad (1)$$

Визначимо ΔS :

$$\Delta S = S_n,$$

де S – поверхня однієї краплі; n - кількість крапель.

$$S = 4\pi R^2, \quad n = \frac{V}{V_1},$$

де V і V_1 – відповідно об'єм 1 кг води і краплі.

Підставимо значення ΔS у формулу (1):

$$\Pi = 4\pi R^2 \frac{V}{V_1} \sigma_e.$$

Визначимо V і V_1

$$V = \frac{m}{\rho_e}, \quad V_1 = \frac{4}{3}\pi R^3,$$

тоді

$$\Pi = \frac{4\pi R^2 m \sigma_e}{\rho_e \frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3m \sigma_e}{\rho_e R}.$$

Розрахуємо, наскільки підвищилася б температура води, якби не було теплообміну з навколишнім середовищем.

$$Q = c_e m \Delta T \Rightarrow \Delta t = \frac{Q}{c_e m}.$$

Згідно із законом збереження енергії $Q = \Pi$, тоді

$$\Delta T = \frac{3m \sigma_e}{\rho_e R c_e m} = \frac{3\sigma_e}{\rho_e R c_e}.$$

Обчислення:

$$[\Delta T] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Дж}} = \text{К};$$

$$\{\Delta T\} = \frac{3 \cdot 73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 4200} = 0,1.$$

Відповідь: $\Delta T = 0,1 \text{ К.}$

Аудиторне заняття

1. Над поверхнею Землі, площа якої $S = 5,0 \text{ км}^2$, шар повітря завтовшки $h = 100 \text{ м}$ має температуру $t_1 = 20^\circ\text{C}$ і відносну вологість $\varphi = 73\%$. Знайти масу дощу, що випав над цією поверхнею в результаті охолодження повітря до температури $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Густина насиченої водяної пари при температурах t_1 і t_2 становить відповідно $\rho_{01} = 17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ і $\rho_{02} = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $m = 1,6 \cdot 10^7 \text{ кг}$.

2. Яку роботу проти сил поверхневого натягу треба виконати, щоб видути мильну бульбашку радіусом R ? Чому дорівнює надлишковий тиск усередині бульбашки?

Дано:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $\Delta p = \frac{4\sigma}{R}$.

Домашнє завдання

1. Повітря в приміщені має температуру $t_1 = 24^\circ\text{C}$ і відносну вологість $\varphi = 50\%$. Визначити вологість повітря після його охолодження до $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Процес охолодження вважати ізохоричним. Тиск насиченої водяної пари при 24°C і 20°C дорівнює відповідно $p_{01} = 2943$ Па і $p_{02} = 2330$ Па.

Дано:



CI:

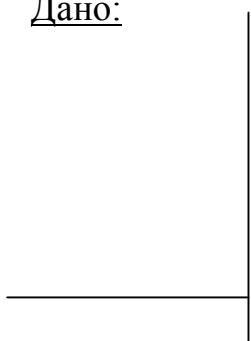


Розв'язання:

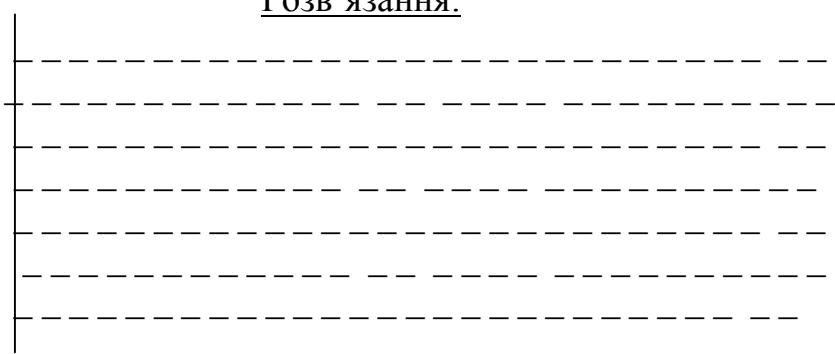
Відповідь: $\varphi_2 = 62\%$.

2. Дротяна рамка з рухомою перекладиною завдовжки $l_1 = 8,0$ см затягнута мильною плівкою. Яку роботу потрібно виконати проти сил поверхневого натягу, щоб розтягти плівку на $l_2 = 2,0$ см? Поверхневий натяг плівки $\sigma = 4,0 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Дано:



CI:

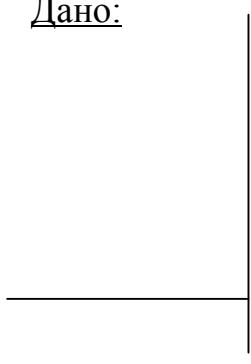


Розв'язання:

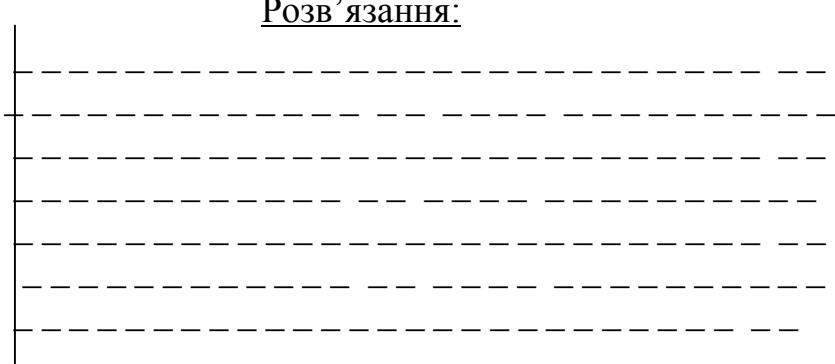
Відповідь: $A = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Дж.

3. Визначити діаметр трубки ртутного барометра, якщо поправка Δh , яку вносять до його показань через капілярне опускання ртуті, дорівнює 3,0 мм. Поверхневий натяг ртуті $\sigma = 472$ мН/м, її густина $\rho = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Дано:



CI:



Розв'язання:

Відповідь: $d = 4,7 \cdot 10^{-3}$ м.

6 ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ І РІДКИХ ТІЛ

Таблиця 6

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$l = l_0(1 + \alpha\Delta T)$, $\Delta T = T - T_0$, $\alpha = \frac{l - l_0}{l_0\Delta T}$	Лінійне розширення	l_0 - довжина тіла при температурі $T_0 = 273$ К; l - довжина тіла при температурі T $[\alpha] = 1 \text{ K}^{-1}$; α - коефіцієнт лінійного розширення.
2	$V = V_0(1 + \beta\Delta T)$, $\beta = \frac{V - V_0}{V_0\Delta T}$	Об'ємне розширення	V_0, V - об'єм тіла при температурі T_0 та температурі T ; $[\beta] = 1 \text{ K}^{-1}$.
3	$\beta \approx 3\alpha$	Зв'язок між коефіцієнтами об'ємного і лінійного розширення для твердих тіл.	
4	$\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T)$	Зміна густини тіла при збільшенні температури.	ρ_0, ρ - густина тіла при температурі T_0 та температурі T .

Заняття 6 *Лінійне і об'ємне розширення твердих і рідких тіл*

Приклад 1. Яку силу треба докласти до мідного дроту перерізом 10 мм^2 , щоб розтягнути його настільки, наскільки він видовжується при нагріванні на 20 К?

Дано:

$S = 10 \text{ мм}^2$	<u>CI:</u> $S = 10^{-5} \text{ м}^2$
$\Delta T = 20 \text{ К}$	<u>Розв'язання:</u>
$E_{mid} = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$	При нагріванні дроту відбувається
$\sigma_{mid} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$	його видовження на $\Delta l = l_2 - l_1$.
$F - ?$	$l_1 = l_0(1 + \alpha t_1)$, $l_2 = l_0(1 + \alpha t_2)$

де l_0 - довжина дроту при 0 °C = 273 К.
Підставивши у відповідності, отримаємо

$$\Delta l = l_0 \alpha (t_2 - t_1) = l_0 \alpha \Delta t = l_0 \alpha \Delta T . \quad (1)$$

За умовою задачі дріт має отримати таке саме видовження при деформації. За законом Гука:

$$\sigma = E|\varepsilon| = E \frac{|\Delta l|}{l_0}, \quad \Delta l = \frac{\sigma l_0}{E} . \quad (2)$$

Розпишемо механічну напругу: $\sigma = \frac{F}{S}$ й підставимо її в рівняння (2):

$$\Delta l = \frac{F l_0}{SE} . \quad (3)$$

Прирівнюючи праві частини рівняння (1) та (3), дістанемо:

$$\frac{F l_0}{SE} = l_0 \alpha \Delta T , \text{ звідки } F = \alpha \Delta T \cdot SE .$$

Обчислення:

$$[F] = K^{-1} \cdot K \cdot m^2 \cdot Pa = H ;$$

$$\{F\} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 20 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^{11} \approx 410 .$$

Відповідь: $F \approx 410 \text{ H} .$

Приклад 2. При 0°C скляна колба вміщує 680 г ртуті, а при $100^\circ\text{C} - 670 \text{ г ртуті. Визначити коефіцієнт лінійного розширення скла.}$

Дано:

$$m_0 = 680 \text{ г}$$

$$t_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$m = 670 \text{ г}$$

$$t = 100^\circ\text{C}$$

$$\beta_{pm} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_{ck} - ?$$

CI:

$$m_0 = 0,68 \text{ кг}$$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

$$m = 0,67 \text{ кг}$$

$$T = 373 \text{ K}$$

Розв'язання:

Коефіцієнт лінійного розширення скла

$$\alpha_{ck} = \frac{1}{3} \beta_{ck} .$$

β_{ck} можна визначити із спiввiдношення:

$$V = V_0 (1 + \beta_{ck} \Delta T) ,$$

де V i V_0 – об’єми колби і наповнюючої колбу ртуті при відповідних температурах.

Маса ртуті, яка займає об’єм V , дорівнює $m = \rho V$, причому

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_{pm} \Delta T}.$$

Маса ртути, яка займає об'єм V_0 , дорівнює $m_0 = \rho_0 V_0$. Візьмемо відношення мас m і m_0 підставимо отримані вирази для ρ і V та визначимо β_{ck}

$$\frac{m}{m_0} = \frac{\rho V}{\rho_0 V_0} = \frac{\rho_0 V_0 (1 + \beta_{ck} \Delta T)}{\rho_0 V_0 (1 + \beta_{pm} \Delta T)} = \frac{1 + \beta_{ck} \Delta T}{1 + \beta_{pm} \Delta T}.$$

Визначимо β_{ck}

$$\frac{m}{m_0} (1 + \beta_{pm} \Delta T) = 1 + \beta_{ck} \Delta T,$$

$$\beta_{ck} = \frac{\frac{m}{m_0} (1 + \beta_{pm} \Delta T) - 1}{\Delta T} = \frac{m (1 + \beta_{pm} \Delta T) - m_0}{m_0 \Delta T},$$

$$\alpha_{ck} = \frac{1}{3} \frac{m (1 + \beta_{pm} \Delta T) - m_0}{m_0 \Delta T}.$$

Обчислення:

$$[\alpha_{ck}] = \frac{\text{кг} (1 + K^{-1} \cdot K) \text{кг}}{\text{кг} \cdot K} = \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot K} = K^{-1};$$

$$\{\alpha_{ck}\} = \frac{1 \cdot 0,67 (1 + 0,00018 \cdot 100) - 0,68}{3 \cdot 0,68 \cdot 100} \approx 1 \cdot 10^{-5}.$$

Відповідь: $\alpha_{ck} \approx 1 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.

Аудиторне заняття

1. Яку довжину при температурі 273 К повинен мати залізний та мідний стрижень, щоб при любих температурах різниця їх довжин була 10 см?

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $l_{0ж} = 0.32 \text{ м}; l_{0м} = 0.22 \text{ м.}$

2. Маємо 500 см^3 керосину при температурі 30°C . Визначити його масу, якщо густина керосину при 0°C дорівнює $800 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Дано:

CI:

Розв'язання:

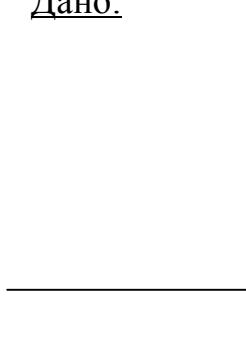
<hr/>		

Відповідь: $m = 0.388 \text{ кг.}$

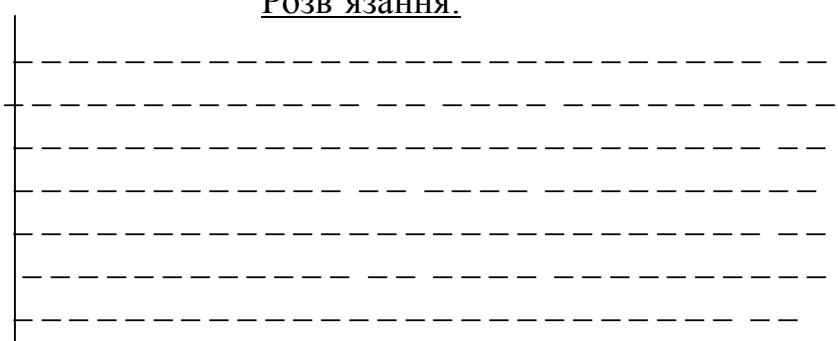
Домашнє завдання

1. Дві лінійки (мідна та залізна) накладені одна на одну так, що вони збігаються одними кінцями. Визначити довжини лінійок при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, знаючи, що різниця їхніх довжин складає l при всякій температурі ($\alpha_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, $\alpha_{Fe} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$).

Дано:



CI:

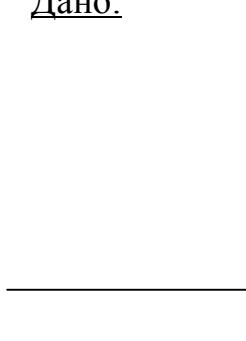


Розв'язання:

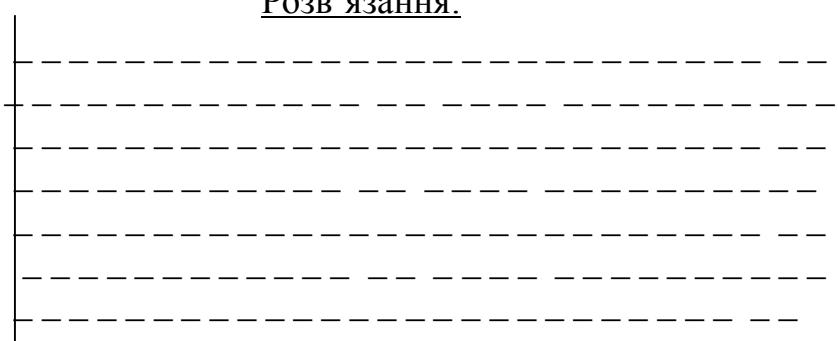
Відповідь: $3,4 \cdot l$; $2,4 \cdot l$.

2. Знайти густину ртуті при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Густина ртуті при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $13,6\text{ г/см}^3$, $\beta_{pm} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$.

Дано:



CI:



Розв'язання:

Відповідь: $\rho_{100} = 1,35 \cdot 10^4\text{ кг/м}^3$; $\rho_{-30} = 1,367 \cdot 10^4\text{ кг/м}^3$.

7 ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Таблиця 7

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	<p>Електричний заряд (q) – фізична величина, яка характеризує властивість тіл і частинок вступати в електромагнітну взаємодію. Розрізняють позитивні та негативні заряди.</p> <p>Мінімальний електричний заряд, існуючий у природі – це заряд елементарних частинок – електронів (e).</p>	$[q] = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл}$
2	$q_1 + q_2 + \dots + q_n = const$	Закон збереження заряду: алгебраїчна сума зарядів усіх тіл ізольованої системи залишається незмінною при будь-яких процесах чи явищах всередині системи.	
3	$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$ $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$	Закон Кулона: модуль сили електростатичної взаємодії між двома точковими зарядами (q_1 і q_2), які знаходяться у вакуумі, прямо пропорційні добутку модулів їхніх зарядів і обернено пропорційні квадрату відстані (r) між ними.	$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2};$ ϵ_0 - електрична стала; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{12} \frac{\Phi}{\text{м}}$.
4	$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$	У діелектриках сила взаємодії зменшується в ϵ разів.	ϵ - діелектрична проникність середовища.
5	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$	Напруженість електричного поля (\vec{E}) – силова характеристика поля.	$[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

		Пробний заряд (q_0) – це точковий позитивний заряд, що вноситься в поле.	
6	$\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$	Сила , з якою електростатичне поле діє на пробний заряд називається, кулонівською силою .	
7	$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$	Принцип суперпозиції (накладання): напруженість поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженості полів, створених кожним із них зокрема.	
8	$E_1 = k \frac{|q|}{\epsilon r^2} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$	Напруженість поля точкового заряду (q).	
9	$\sigma = \frac{q}{S}$	Поверхнева густина заряду (σ) – це величина, що дорівнює електричному заряду, який розподілений на одиниці площини поверхні (S).	$[\sigma] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.
10	$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0\epsilon}$	Напруженість поля нескінченної зарядженої плоскої поверхні (однорідне поле).	
11	$E = 2E_{nl} = \frac{|\sigma|}{\epsilon_0\epsilon}$	Для рівномірно різномірно заряджених паралельних нескінчених площин напруженість подвоюється.	
		Робота в електростатичному (потенціальному) полі: - не залежить від шляху, а визначається координатами точок, між якими переноситься заряд; - у будь-якому замкненому контурі дорівнює нулю.	

12	$\varphi_1 = \frac{A_k \text{ } 1 \rightarrow \infty}{q}$	Потенціал поля (φ) в даній точці є величина, що дорівнює роботі кулонівських сил при переміщенні одиночного позитивного заряду з даної точки у нескінченість.	$[\varphi] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1\text{В.}$
13	$\varphi_1 = \frac{W_{n1}}{q},$ якщо $W_\infty = 0,$ $\varphi_1 = k \frac{q}{\epsilon r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$	Потенціал поля в даній точці є величина, що дорівнює потенціальній енергії одиночного позитивного заряду, поміщеного в дану точку, якщо його потенціальну енергію в нескінченості вважати рівною нулю.	
14	$E = -\frac{\Delta\varphi}{l}$	Напруженість (E) у будь-якій точці електростатичного поля дорівнює зміні потенціалу ($\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$), який припадає на одиницю довжини ліній напруженості поля (l).	$[E] = 1 \frac{\text{В.}}{\text{м}}$.
15	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_k \text{ } 1-2}{q}$	Різниця потенціалів двох точок поля – це величина, яка дорівнює роботі кулонівських сил при переміщенні одиничного позитивного заряду із 1-ої точки у 2-у.	
16	$U = \frac{A_k + A_{cm}}{q},$ $A = A_k \Rightarrow U = \varphi_1 - \varphi_2$	Напруга - це величина, яка дорівнює роботі всіх (кулонівських і сторонніх) сил при перенесенні одиничного позитивного заряду через дану ділянку. Якщо діють тільки кулонівські сили.	$[U] = 1 \text{ В.}$
17	$A = qU,$ $A = qEd$	Робота по переміщенню заряду q в електростатичному полі.	d - проекція переміщення заряду на лінію E .

18	$C = \frac{q}{U}$, $U = \varphi_1 - \varphi_2$	Електрична ємність – це властивість двох провідників накопичувати заряд у відповідності до різниці потенціалів, що виникає.	$[C] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = 1\Phi (\text{Фарад});$ $1\text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi;$ $1\text{ п}\Phi = 10^{-12} \Phi.$
19	$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d}$	Плоский конденсатор – це конструкція із плоских пластин провідника, розділених діелектриком.	
20	$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$	При паралельному з'єднанні конденсаторів сумарна ємність зростає.	
21	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$	При послідовному з'єднанні конденсаторів сумарна ємність зменшується.	
22	$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}$	Електрична енергія конденсатора.	$[W] = 1 \text{ Дж.}$

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

При розв'язанні задач, пов'язаних із взаємодією точкових зарядів, насамперед зробіть рисунок, зобразіть на ньому сили, що діють на заряди. Якщо за умовою задачі заряд перебуває в стані рівноваги, запишіть умову його рівноваги. Якщо заряд рухається в однорідному електричному полі, запишіть рівняння його руху.

У задачах на застосування роботи сил електричного поля для переміщення заряду складіть рівняння на основі закону збереження і перетворення енергії. Якщо при взаємодії тіл відбувається перерозподіл зарядів, слід скласти рівняння згідно із законом збереження заряду. Отриману систему рівнянь розв'яжіть відносно шуканої величини.

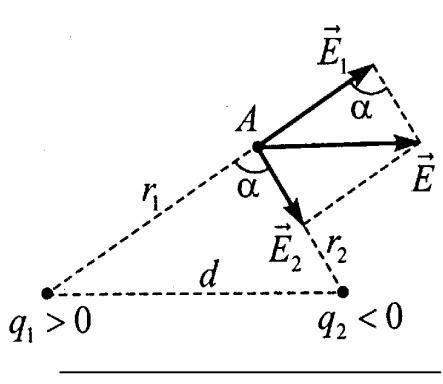
При розв'язанні задач, пов'язаних із взаємодією заряджених тіл, застосуйте формули, що дадуть змогу встановити зв'язок між зарядами і потенціалами. Якщо задано складну схему з'єднання конденсаторів, треба змінити її простішою рівноцінною схемою, за якою можна визначити вид з'єднання (паралельне, послідовне чи комбіноване). Інколи для цього достатньо лише накреслити задану схему дещо по-іншому.

Заняття 7

Закон Кулона. Напруженість поля. Потенціал

Приклад 1. Два точкові заряди $q_1 > 0$ і $q_2 < 0$ розташовані в повітрі на відстані d один від одного. Визначити напруженість і потенціал поля, що створюють ці заряди в точці A , яка перебуває на відстані r_1 , від позитивного заряду і на відстані r_2 – від негативного. (Точка А не лежить на прямій, що сполучає заряди q_1 і q_2 , $d < r_1 + r_2$.)

Дано:



\vec{E} - ?

Розв'язання:

Згідно з принципом суперпозиції полів, напруженість електричного поля в точці A (мал.) $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, де \vec{E}_1 і \vec{E}_2 - напруженості полів, що створили в цій точці відповідно заряди q_1 і q_2 . Додавши вектори \vec{E}_1 і \vec{E}_2 за правилом паралелограма, знайдемо модуль вектора \vec{E} , застосовуючи теорему косинусів:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \alpha},$$

$$\text{де } E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}, \quad E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}, \quad \cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1 r_2}.$$

У точці A потенціал поля $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, де φ_1 і φ_2 – потенціали полів, що створюють в цій точці заряди q_1 і q_2 :

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}, \quad \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2}.$$

$$\text{Відповідь: } \varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}; \quad \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2}.$$

Приклад 2. Дві кульки однакової маси підвішені на тонких шовкових нитках довжиною 0,2 м так, що їх поверхні торкаються одна одної. Після того, як кульки зарядили однаковими за величиною електричними зарядами по $4 \cdot 10^{-7}$ Кл, вони відштовхнулися одна від одної і розійшлися на кут 60° . Визначити масу кульок. Для повітря $\epsilon = 1$.

Дано:

$$\varepsilon = 1$$

$$l = 0,2 \text{ м}$$

$$r_{1,2} = r$$

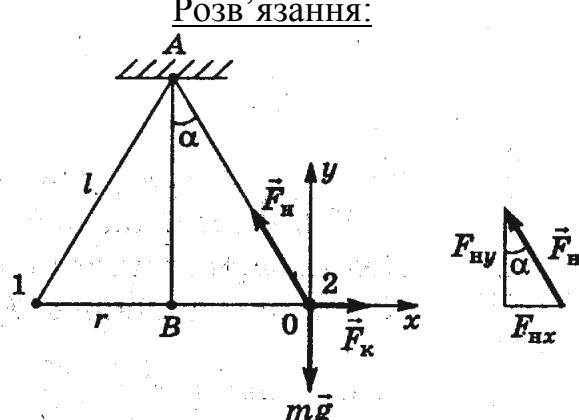
$$q_1 = q_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$k = 9 \cdot 10^{-9} (\text{Н} \cdot \text{м}^2) / \text{Кл}^2$$

$$2\alpha = 60^\circ$$

$$m_1 = m_2 = m - ?$$

Розв'язання:



Коли кульки розійшлися, на кожну з них діятимуть три сили: сила тяжіння $m\vec{g}$, сила натягу нитки \vec{F}_h , кулонівська сила \vec{F}_k . За умовою задачі рівнодіюча цих сил, діючих на кожну з куль, дорівнює нулю (умова їх рівноваги):

$$\vec{F}_h + m\vec{g} + \vec{F}_k = 0 \text{ (рис.)}.$$

Оберемо систему координат xOy і запишемо умову рівноваги в проекціях на осі Ox і Oy :

$$\begin{aligned} Ox & \left\{ F_k - F_h \sin \alpha = 0 \right. \\ Oy & \left. F_h \cos \alpha - mg = 0 \right. \end{aligned}$$

Розв'яжемо систему рівнянь відносно невідомого m :

$$m = \frac{F_h \cos \alpha}{g} = \frac{F_k \cos \alpha}{g \sin \alpha}.$$

За законом Кулона

$$F_k = \frac{k|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2} = \frac{kq^2}{\varepsilon r^2}.$$

Із ΔAOB

$$r = 2l \sin \alpha,$$

тобто

$$F_k = \frac{kq^2}{\varepsilon \cdot 4l^2 \sin^2 \alpha}.$$

Отже

$$m = \frac{kq^2 \cos \alpha}{g \sin \alpha \cdot \varepsilon \cdot 4l^2 \sin^2 \alpha} = \frac{kq^2 \cos \alpha}{4\varepsilon \cdot g l^2 \sin^3 \alpha}.$$

Обчислення:

$$[m] = \frac{H \cdot m^2 \cdot K_L^2}{K_L^2 \cdot \frac{m}{c^2} \cdot m^2} = \frac{K \Gamma \frac{m}{c^2}}{\frac{m}{c^2}} = K \Gamma ;$$

$$\{m\} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 16 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{4 \cdot 1 \cdot 9,8 \cdot (0,2)^2 \cdot (0,5)^3} \approx 6 \cdot 10^{-3}.$$

Відповідь: $m \approx 6 \cdot 10^{-3}$ кг.

Аудиторне заняття

1. Однакові металеві кульки заряджені однайменно зарядами q і $4q$, розташовані на відстані r одна від одної. Кульки доторкнули одну до одної. Над яку відстань x їх треба розвести, щоб сила взаємодії не змінилася?

Дано:

Розв'язання:

--	--

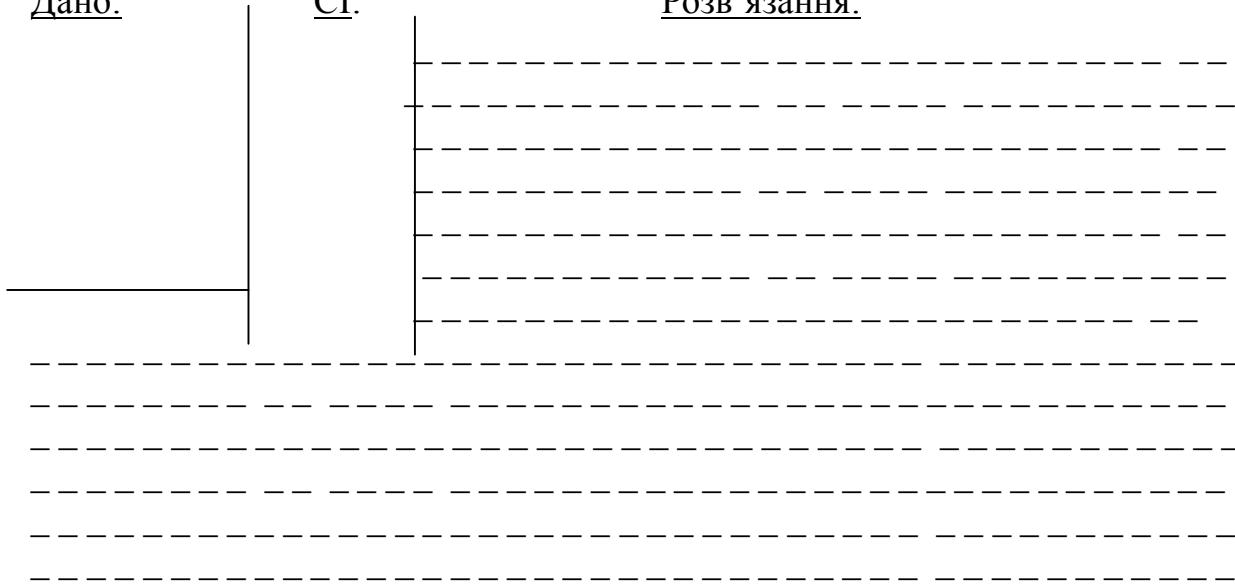
Відповідь: $x = 1,25 r$.

2. Визначити напруженість поля заряду 36 нКл у точках, віддалених від нього на 9 і 18 см.

Дано:

CI:

Розв'язання:



Відповідь: $E_1 = 40 \text{ кВ/м}$; $E_2 = 10 \text{ кВ/м}$.

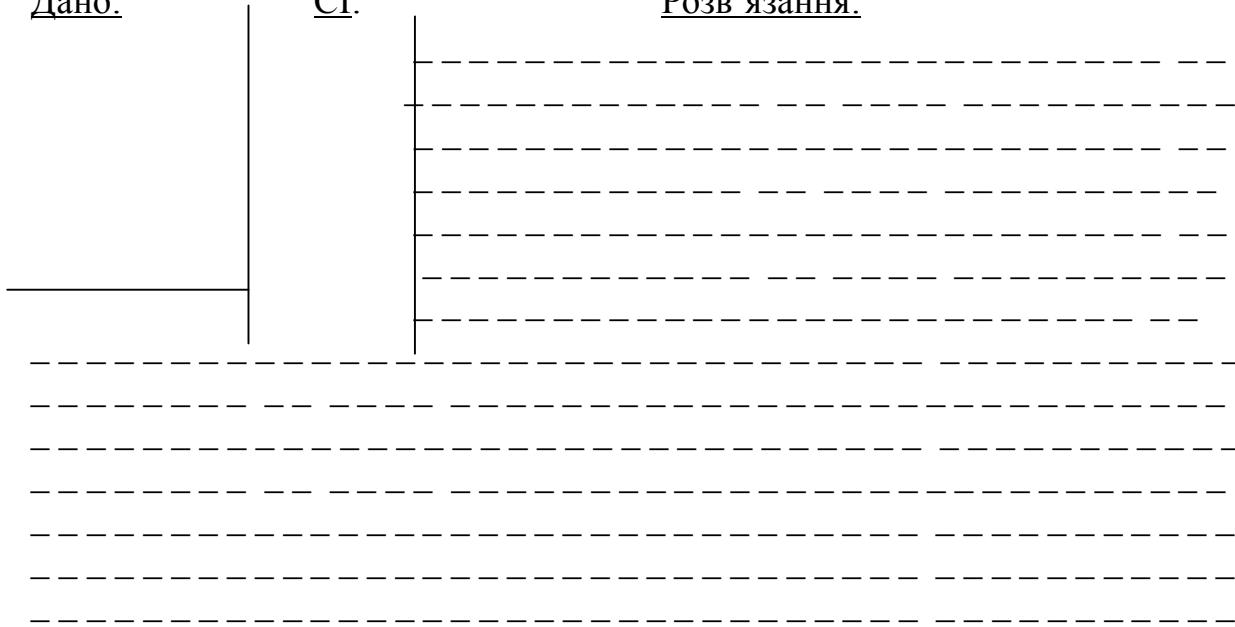
Домашнє завдання

1. Два заряди по 25 нКл кожний, розташовані на відстані 24 см один від одного, утворюють електростатичне поле. З якою силою це поле діє на заряд 2 нКл, розташований у точці, віддаленій на 15 см від кожного із зарядів, якщо заряди, які утворюють поле, однайменні та різнойменні?

Дано:

CI:

Розв'язання:



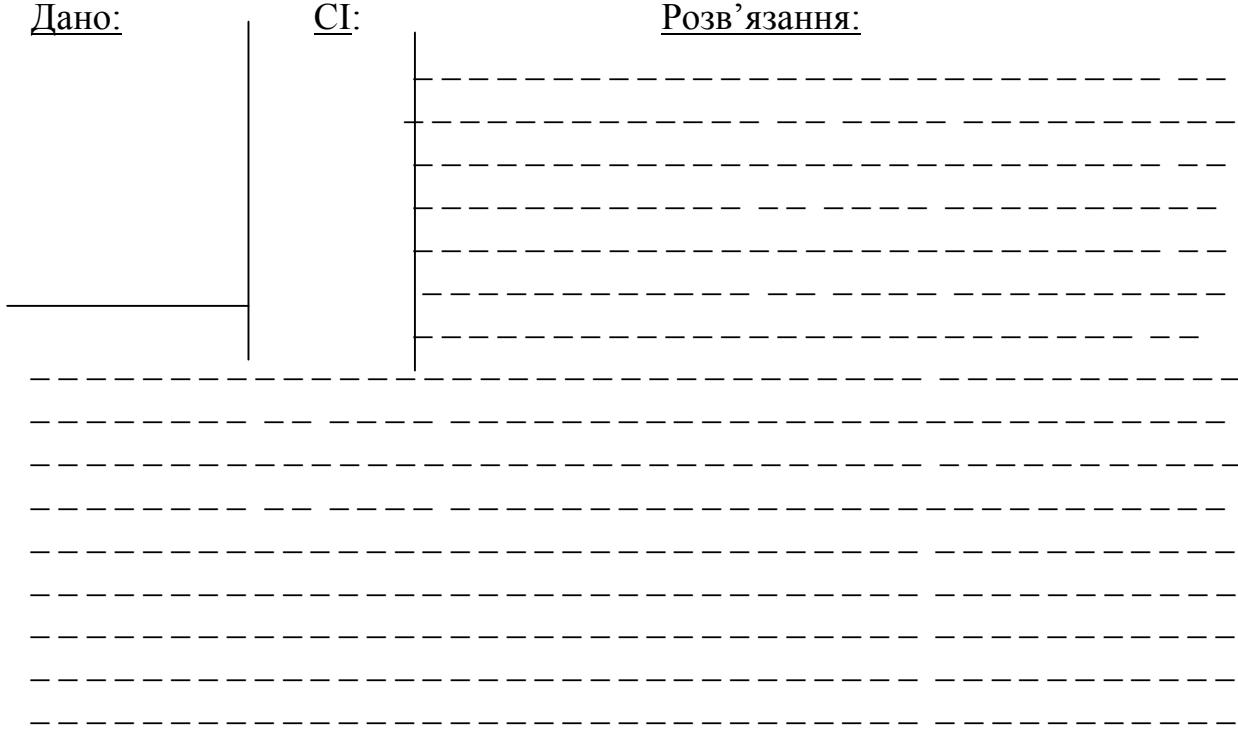
Відповідь: $F = 24 \text{ мкН}$; $F = 32 \text{ мкН}$.

2. На відстані 3 см від заряду 4 нКл, розташованого в рідкому діелектрику, напруженість поля становить 20 кВ/м. Яка діелектрична проникність діелектрика?

Дано:

CI:

Розв'язання:



Відповідь: $\epsilon = 2$.

Заняття 8

Робота в електростатичному полі. Різниця потенціалів. Напруга

Приклад 1. Яку роботу потрібно виконати, щоб перенести точковий заряд $q = 6$ нКл із нескінченості в точку, розташовану на відстані $l = 10$ см від поверхні металевої кульки, потенціал якої $\varphi = 200$ В, а радіус $R = 2$ см? Кулька перебуває в повітрі ($\epsilon = 1$).

Дано:

$$q = 6 \text{ нКл}$$

$$l = 10 \text{ см}$$

$$\varphi = 200 \text{ В}$$

$$R = 2 \text{ см}$$

$$\epsilon = 1$$

$$A - ?$$

CI:

$$q = 6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$l = 0,1 \text{ м}$$

$$R = 0,02 \text{ м}$$

Розв'язання:

Робота A , яку потрібно виконати, щоб перенести заряд із точки з потенціалом φ_1 у точку з потенціалом φ_2 , відрізняється від роботи електричного поля A_{π} лише знаком:

$$A = -A_{\pi}.$$

Оскільки $A_{\pi} = q (\varphi_1 - \varphi_2)$, то

$$A = -q(\varphi_1 - \varphi_2) = q(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1)$$

За умови, що початкова точка перебуває у нескінченності $\varphi_1 = 0$, знайдемо потенціал поля в кінцевій точці φ_2 . Нехай q – заряд кульки. Тоді потенціал поверхні кульки дорівнює:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R}, \quad (2)$$

а потенціал у кінцевій точці, розташованій на відстані $R + l$ від центра кульки, становить:

$$\varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon(R + l)} \quad (3)$$

Поділивши почленно рівняння (3) на (2), визначимо:

$$\varphi_2 = \frac{R\varphi}{R + l} \quad (4)$$

Підставивши у формулу (1) значення $\varphi_1 = 0$ і φ_2 , отримаємо:

$$A = \frac{qR\varphi}{R + l}.$$

Обчислення:

$$[A] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м} \cdot \text{В}}{\text{м}} = \text{Дж};$$

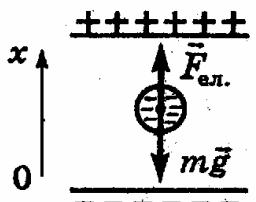
$$\{A\} = \frac{6 \cdot 10^{-9} \cdot 0,02 \cdot 200}{0,02 \cdot 0,1} = 2 \cdot 10^{-7}.$$

Відповідь: $A = 2 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Приклад 2. Визначити кількість електронів, які утворюють заряд пилинки масою $5 \cdot 10^{-9}$ г, якщо остання перебуває у стані рівноваги в електричному полі, створюваному двома зарядженими пластинами. Різниця потенціалів між пластинами $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = 3000$ В, відстань між ними 2 см.

<u>Дано:</u>	<u>CI:</u>
$m = 5 \cdot 10^{-9}$ г	$m = 5 \cdot 10^{-12}$ кг
$\varphi_1 - \varphi_2 = 3000$ В	$\varphi_1 - \varphi_2 = 3000$ В
$d = 2$ см	$d = 2 \cdot 10^{-2}$ м
$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
$n - ?$	

Розв'язання:
Аналізуючи умови задачі, побудуємо рисунок. Зобразимо сили, що діють на пилинку (рис.). Оскільки пилинка перебуває в рівновазі, то рівнодіюча сил, що діють на неї, дорівнює нулю:



$$\vec{F}_{\text{рівн.}} = 0, \text{ або } \vec{F}_{\text{ел.}} + m\vec{g} = 0.$$

В проекції на вісь Ox:

$$F_{\text{ел.}} - mg = 0, \quad F_{\text{ел.}} = mg.$$

Нехай заряд пилинки q , тоді електрична сила, яка діє на неї, дорівнює

$$F_{\text{ел.}} = qE.$$

Оскільки $E = \frac{\Delta\varphi}{d}$, то $F = q \frac{\Delta\varphi}{d}$.

З умови рівноваги знаходимо

$$q \frac{\Delta\varphi}{d} = mg, \quad \text{звідки} \quad q = \frac{mgd}{\Delta\varphi}.$$

Кількість електронів, які утворюють заряд пилинки, можна визначити, розділивши її заряд на заряд одного електрона:

$$n = \frac{q}{|e|}, \text{ тобто } n = \frac{mgd}{\Delta\varphi \cdot |e|}.$$

Обчислення:

$$[n] = \frac{\text{КГ} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{М}}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}} = 1 \text{ (безрозмірна величина);}$$

$$\{n\} = \frac{5 \cdot 10^{12} \cdot 9,8 \cdot 0,02}{3000 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,04 \cdot 10^3.$$

Відповідь: $n = 2040$ електронів.

Аудиторне заняття

1. В однорідному електричному полі, напруженість якого 1 кВ/м, перемістили на 2 см у напрямі силової лінії заряд 25 нКл. Визначити роботу поля, зміну потенціальної енергії заряду і різницю потенціалів між початковою та кінцевою точками переміщення.

Дано:



CI:



Розв'язання:

Відповідь: $A = -0,5 \text{ мкДж}$; $\Delta E_n = 0,5 \text{ мкДж}$; 20 В.

2. Електрон перемістився в прискорюючому полі з точки, потенціал якої 200 В, у точку з потенціалом 300 В. Визначити кінетичну енергію електрона, зміну його потенціальної енергії і набуту швидкість. Вважати, що початкова швидкість електрона дорівнює нулю.

Дано:



CI:



Розв'язання:

Відповідь: $E_k = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$; $\Delta E_n = -1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$; $v = 5,9 \text{ Мм/с}$.

Домашнє завдання

1. Яку роботу виконує поле під час переміщення заряду 20 нКл з точки, потенціал якої 700 В, у точку з потенціалом 200 В та з точки, потенціал якої 100 В у точку з потенціалом 400 В?

Дано: CI: Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $A_1 = 10 \text{ мкДж}$; $A_2 = -10 \text{ мкДж}$.

2. Напруга між двома точками, що лежать на одній лінії напруженості однорідного поля, дорівнює 2 кВ. Відстань між цими точками 10 см. Яка напруженість поля?

Дано: CI: Розв'язання:

<hr/>		

Відповідь: $E = 20 \text{ кВ/м}$.

Заняття 9

Електросміність. Конденсатор. Енергія електричного поля

Приклад 1. Конденсатори, що мають ємності C , $2C$ і C_x , з'єднали за схемою, поданою на малюнку. Ємність батареї не змінюється при замиканні ключа K . Визначити ємність C_x .

Розв'язання:

Визначимо насамперед ємність батареї при розімкненому ключі. При послідовному з'єднанні двох конденсаторів, що мають ємності C_1 і C_2 , їхня загальна ємність становить:

$$C_{\text{заг}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

За цією формулою знайдемо, що при розімкненому ключі ємність верхнього відгалуження, яке складається з послідовно з'єднаних конденсаторів, що мають ємності C і $2C$, дорівнює:

$$\frac{C \cdot 2C}{C + 2C} = \frac{2}{3} C.$$

Ємність нижнього відгалуження, що складається з послідовно з'єднаних конденсаторів, які мають ємності C_x і C , становить:

$$\frac{C_x C}{C_x + C}.$$

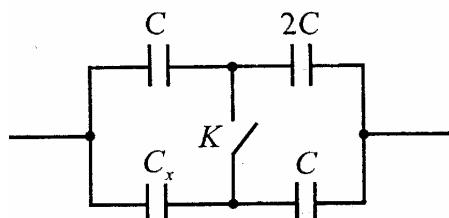
Верхня і нижня ділянки з'єднані між собою паралельно, а тому ємність батареї визначимо так:

$$C' = \frac{2}{3} C + \frac{C_x C}{C_x + C}. \quad (1)$$

При замкнутому ключі конденсатори, що мають ємності C і C_x , з'єднані паралельно, їхня загальна ємність дорівнює $C + C_x$. Конденсатори, які мають ємності $2C$ і C , також з'єднані паралельно, їхня загальна ємність становить $2C + C = 3C$. Ділянки, ємності яких $C + C_x$ і $3C$ з'єднані послідовно. Отже, при замкнутому ключі ємність батареї дорівнює:

$$C'' = \frac{3C(C + C_x)}{3C + C + C_x} = \frac{3C(C + C_x)}{4C + C_x} \quad (2)$$

За умовою задачі $C' = C''$, тому на основі формул (1) і (2) маємо:



$$\frac{2}{3}C + \frac{C_x C}{C_x + C} = \frac{3C(C + C_x)}{4C + C_x}$$

Розв'язавши це рівняння відносно C_x , отримаємо значення шуканої величини:

$$C_x = \frac{C}{2}.$$

Відповідь: $C_x = \frac{C}{2}$.

Приклад 2. Електрон влітає в плоский горизонтальний конденсатор паралельно до його пластин зі швидкістю $v_0 = 1,0 \cdot 10^7$ м/с. Напруженість електричного поля в конденсаторі $E = 100$ В/см, довжина конденсатора $l = 5,0$ см. Визначити модуль і напрям швидкості електрона в момент його вильоту з конденсатора. На скільки відхилився електрон від початкового напряму?

Дано:

$$v_0 = 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$E = 100 \text{ В/см}$$

$$l = 5,0 \text{ см}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$h - ? \quad v - ? \quad \alpha - ?$$

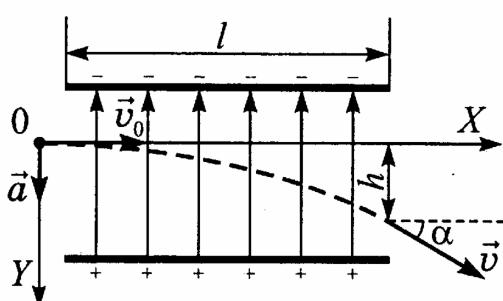
CI:

$$E = 1 \text{ В/м}$$

$$l = 0,05 \text{ м}$$

Розв'язання:

Оберемо початок системи координат у точці, де перебував електрон у момент влітання в конденсатор вісь OX спрямуємо горизонтально, вісь OY - вертикально вниз (рис.).



У цій системі координат рух електрона можна розглядати як результат додавання двох прямолінійних рухів: рівномірного руху зі швидкістю v_0 у горизонтальному напрямку і рівноприскореного руху з певним прискоренням \vec{a} уздовж осі OY .

Наявність прискорення уздовж осі OY пояснюється тим, що на електрон у цьому напрямку діє електрична сила $\vec{F} = -e\vec{E}$, де e – модуль заряду електрона: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (силою тяжіння, що діє на електрон, нехтуємо порівняного з силою \vec{F}).

Проекцію прискорення \vec{a} на вісь OY знайдемо за другим законом Ньютона:

$$eE = m_e a_y, \text{ звідки } a_y = \frac{eE}{m_e},$$

де m_e - маса електрона.

Запишемо початкові умови: $x_0 = 0, y_0 = 0, v_{0x} = v_0, v_{0y} = 0$. Значення проекції прискорення електрона на осі координат: $a_x = 0, a_y = \frac{eE}{m_e}$.

Тоді рівняння, що виражают залежність координат x, y і проекцій швидкості v_x, v_y , від часу, матимуть вигляд:

$$x = v_0 t, \quad y = \frac{eEt^2}{2m_e}, \quad (1)$$

$$v_x = v_0, \quad v_y = \frac{eEt}{m_e}. \quad (2)$$

У момент вильоту електрона з конденсатора $x = l, y = h, t = t_1$. Із рівнянь (1) і (2) одержимо:

$$t_1 = \frac{l}{v_0}, \quad v_y = \frac{eEl}{m_e v_0}, \quad h = \frac{eEl^2}{2m_e v_0^2}.$$

Модуль вектора швидкості електрона в момент вильоту дорівнює:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{eEl}{m_e v_0}\right)^2}.$$

Напрям вектора швидкості \vec{v} визначимо за кутом α . Згідно з рис. ,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_0} = \frac{eEl}{m_e v_0^2}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{eEl}{m_e v_0^2}.$$

Обчислення:

$$[h] = \frac{\text{Кл} \cdot \frac{\text{В}}{\text{М}} \cdot \text{М}^2}{\frac{\text{М}^2}{\text{КГ} \cdot \frac{\text{М}^2}{\text{С}^2}}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^2}{\text{КГ} \cdot \text{М}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{КГ} \cdot \text{М}} = \frac{\text{КГ} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{КГ} \cdot \text{с}^2} = \text{М};$$

$$[v_x] = \frac{\text{Кл} \cdot \frac{\text{В}}{\text{М}} \cdot \text{с}}{\text{КГ}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{КГ} \cdot \text{М}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{КГ} \cdot \text{М}} = \frac{\text{КГ} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{КГ} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{М}}{\text{с}};$$

$$\{h\} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 0,05^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} (1,0 \cdot 10^7)^2} = 2,2 \cdot 10^{-2};$$

$$\{v_x\} = \sqrt{(1 \cdot 10^7) + \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 0,05}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,0 \cdot 10^7} \right)^2} = 1,3 \cdot 10^7;$$

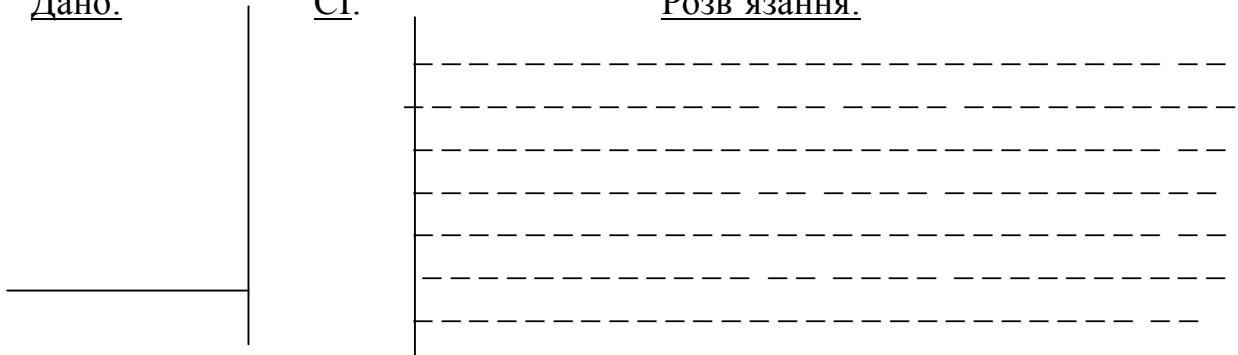
$$\alpha = \arctg \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 0,05}{9,1 \cdot 10^{-31} (1,0 \cdot 10^7)^2} = 42^0.$$

Відповідь: $h = 2,2 \cdot 10^{-2}$ м; $v = 1,3 \cdot 10^7$ м/с; $\alpha = 42^0$.

Аудиторне заняття

1. Однорідне електричне поле, що має напруженість $E = 1 \cdot 10^4$ В/м, створили за допомогою двох заряджених паралельних пластин, розташованих у повітрі на відстані $d = 2$ см одна від одної. Визначити різницю потенціалів між пластинами. Чому дорівнюватиме різниця потенціалів між пластинами, якщо між ними і паралельно до них помістити металевий лист завтовшки $d_1 = 0,5$ см?

Дано:



CI:

Розв'язання:

Відповідь: $U_1 = 1,5 \cdot 10^2$ В.

2. Плоскому конденсатору з електричною ємністю C надали заряд q . Як зміниться енергія конденсатора, якщо між пластинами, що розділені повітрям, внести діелектрик, діелектрична проникливість якого дорівнює 2? Чому?

Дано:

Розв'язання:

<hr/>	

Відповідь: зменшиться в 2 рази.

Домашнє завдання

1. У скільки разів зміниться енергія конденсатора, якщо напругу на ньому збільшити в 4 рази?

Дано:

Розв'язання:

<hr/>	

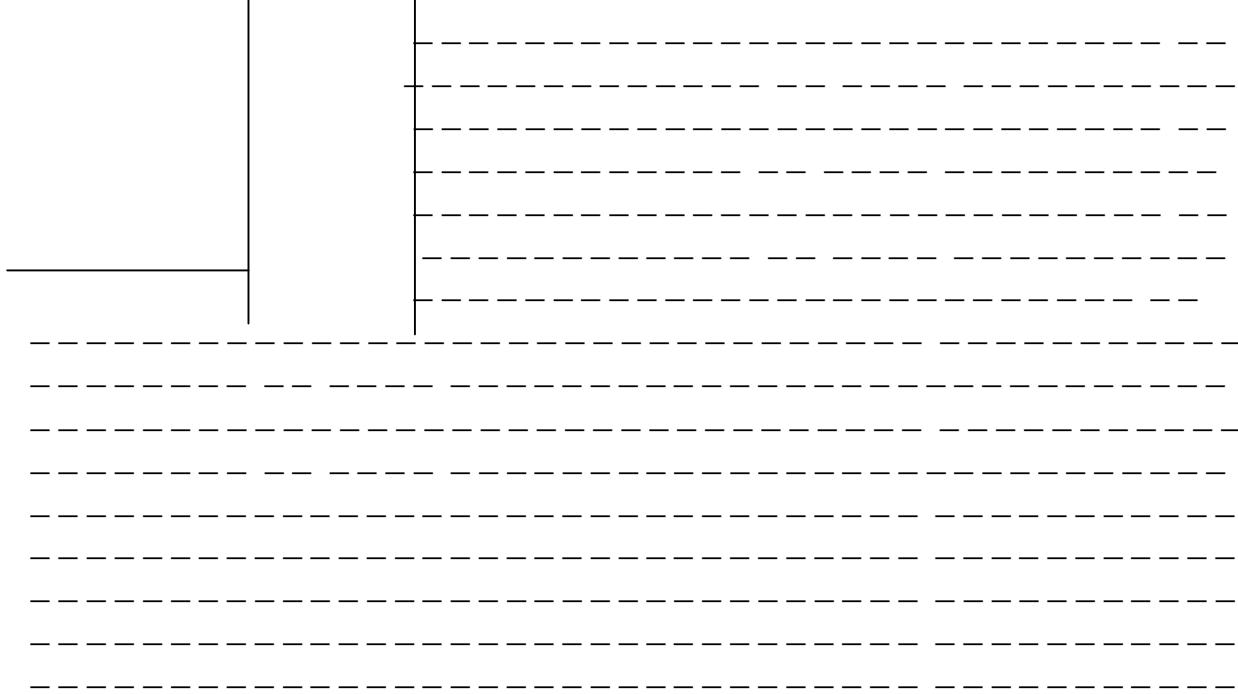
Відповідь: збільшиться у 16 разів.

2. Три конденсатори з'єднані послідовно. Електроємність першого конденсатора 1 мкФ, другого – 5 мкФ та третього 10 мкФ. Різниця потенціалів на полюсах батареї дорівнює 1300 В. Чому дорівнює різниця потенціалів на кожному конденсаторі?

Дано:

CI:

Розв'язання:



Відповідь: $U_1 = 1000$ В; $U_2 = 200$ В; $U_3 = 100$ В.

8 ЗАКОНИ ПОСТИЙНОГО СТРУМУ

Електричний струм – це впорядкований (напрямлений) рух вільних носіїв заряду.

Таблиця 8

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$I = \frac{q}{t}$, $q = It$	Сила струму (I) – скалярна величина, яка чисельно дорівнює кількості заряду q , що переноситься за одиницю часу крізь площину поперечного перерізу. Постійний струм – це струм, сила і напрям якого з часом не змінюються.	$[I] = 1$ А; $[q] = 1$ Кл = 1 А · с.

2	$j = \frac{I}{S}$	Густина струму (j) – векторна величина, модуль якої дорівнює відношенню сили струму до площину перерізу, через яку проходить струм.	$[j] = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.
3	$I = q_0 n \bar{v} S$	Сила струму у провіднику, якщо заряд вільного носія заряду (q_0), концентрація носіїв у провіднику n (іх кількість на одиницю об'єму), середня швидкість упорядкованого руху \bar{v} , а площа поперечного перерізу провідника S .	
4	$j = ne\bar{v}$	Густина струму провідності в металах.	
5	$R = \rho \frac{l}{S}$	Опір провідника (R) – це властивість провідника чинити опір струму, який проходить по ньому.	l - довжина провідника; S - поперечний переріз; $[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом}$.
6	$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$	Питомий опір провідника. Для чистих металів $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}$.	α - термічний коефіцієнт опору; $[\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.
7	$I = \frac{U}{R}$	Закон Ома для ділянки кола: сила струму (I) в ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі (U) і обернено пропорційна опору провідника (R).	
8	$G = \frac{1}{R}$	Електропровідність провідника (G) – це величина, обернена опору провідника.	$[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = 1 \text{ См}$ (Сименс).

9	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$, $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$, $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	При послідовному з'єднанні провідників . Сила струму однакова, оскільки $I = \frac{q}{t}$.	$[U] = 1 \text{ В};$ $[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{ Ом.}$
10	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$	При паралельному з'єднанні провідників . Напруга на провідниках однакова, оскільки $U = \frac{A}{q}$.	$[I] = 1 \text{ А.}$
11	$\xi_{\text{дж}} = \frac{A}{q}$	Електрорушійна сила джерела струму ($\xi_{\text{дж}}$) – величина, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил у джерелі, затраченій на переміщення одиничного позитивного заряду через усе коло.	$[\xi] = 1 \text{ В.}$
12	$A = A_{\text{зовн}} + A_{\text{внутр}}$, $\xi_{\text{дж}} = U_{\text{зовн}} + U_{\text{внутр}}$, $\xi_{\text{дж}} = IR + Ir$	Робота затрачена на переміщення заряду через усе коло, дорівнює сумі робіт на зовнішній ділянці кола і всередині джерела.	
13	$I = \frac{\xi_{\text{дж}}}{R + r}$	Закон Ома для повного кола : сила струму (I) в замкнутому колі дорівнює прямо пропорційна електрорушійній силі джерела ($\xi_{\text{дж}}$) і обернено пропорційна повному опору кола ($R + r$).	
14	$I_{\max} = \frac{\xi_{\text{дж}}}{r}$	Коротке замикання джерела струму, тобто $R \rightarrow 0$.	
15	$U = \xi_{\text{дж}} - Ir$	Напруга на полюсах замкнутого джерела струму.	
16	$U = \xi_{\text{дж}}$, при $R \gg r$	Напруга на полюсах незамкнутого джерела струму.	
17	$\eta = \frac{U}{\xi_{\text{дж}}}$	ККД джерела струму.	

18	$\xi_6 = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n$	При послідовному з'єднанні елементів у батарею, електрорушійна сила батареї дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС елементів.	
19	$\xi_6 = \xi_1$	При паралельному з'єднанні елементів з однаковою ЕРС, електрорушійна сила батареї дорівнює ЕРС одного елемента.	
20	$A = IU t$	Робота струму.	
21	$P = \frac{A}{t}$, $P = IU$	Потужність струму (P).	$[P] = 1 \text{ A} \cdot \text{В} = 1 \text{ Вт}$
22	$Q = I^2 R t$	Закон Джоуля-Ленца про кількість теплоти, яка виділяється при проходженні струму.	$[Q] = 1 \text{ Дж.}$
23	$A = Q = IU t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$, $P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$	Якщо в провіднику струм справляє тільки теплову дію, тоді $A = Q$.	
24	Електроліз – виділення речовини на електродах при проходженні струму через електроліт. Електроліз супроводжується окислюально-відновними реакціями.		
25	$m = kq = kIt$, $k = \frac{A}{Fn} = \frac{M}{neN_A}$, $m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} It$	Перший і другий закони електролізу Фарадея.	k - електрохімічний еквівалент речовини; A - атомна маса; n - валентність речовини; $F = 9.65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ - стала Фарадея; $[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

При розв'язанні задач, пов'язаних із розрахунком електричних кіл постійного струму, накресліть схему та уважно її проаналізуйте: з'ясуйте, як з'єднані джерела струму, резистори і конденсатори. Інколи задану схему слід малювати дещо по-іншому, щоб отримати нову схему, еквівалентну заданій.

Врахуйте, що постійний струм через конденсатор не проходить. Якщо конденсатор у колі постійного струму з'єднаний паралельно з резистором, то на конденсаторі така сама напруга, як і на резисторі.

Розраховувати складні розгалужені електричні кола слід за допомогою правил Кірхгофа. При цьому дій виконуйте в такій послідовності:

- 1) довільно позначте стрілками напрямки струмів у всіх ділянках кола;
- 2) довільно виберіть напрямки обходу контурів (за годинниковою стрілкою або проти);
- 3) складіть систему рівнянь відповідно до першого і другого правил Кірхгофа, при цьому:
 - а) сили струмів, які входять у вузол, беруть зі знаком «плюс», а ті, що виходять – зі знаком «мінус»;
 - б) якщо напрям струму в резисторі збігається з обраним напрямом обходу контура, то відповідний добуток сили струму на опір буде зі знаком «плюс», якщо не збігаються, – зі знаком «мінус»;
- 4) розв'яжіть отриману систему рівнянь, якщо при цьому значення певних сил струмів отримались зі знаком «мінус», це означає, що напрямки цих струмів протилежні вказаним на схемі. Крім цього, правила Кірхгофа можна застосовувати і при розрахунках простих кіл.

При розв'язанні задач, пов'язаних із перетворенням електричної енергії у внутрішню або механічну, складіть рівняння згідно із законом збереження і перетворення енергії. Задачі на електроліз розв'язують, застосовуючи закони Фарадея.

Заняття 10

Постійний струм. Сила струму.

Густина струму. Закон Ома для ділянки кола.

Опір. Електропровідність

Приклад 1. На кожний атом міді припадає 1 електрон провідності. Яка середня швидкість електронів провідності, якщо через мідний дріт діаметром $2 \cdot 10^{-4}$ м протікає струм 10 А?

Дано:
 $I = 10 \text{ А}$

$$d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$A_{\text{Cu}} = 64 \text{ а.ом.}$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$1 \text{ а.ом.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\bar{v} - ?$$

Розв'язання:
 Сила струму в металі: $I = e \cdot n \cdot \bar{v} \cdot S$, звідки

$$\bar{v} = \frac{I}{e \cdot n \cdot S}.$$

Виразимо концентрацію електронів.

За умовою задачі вона дорівнює концентрації атомів міді:

$$n = \frac{\rho}{m_0}.$$

Маса атома $m_0 = A_{\text{а.ом.}} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг/а.ом.}$

Площа поперечного перерізу дроту $S = \frac{\pi d^2}{4}$

$$\bar{v} = \frac{4Im_0}{e\rho\pi d^2} = \frac{4IA \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{e\rho\pi d^2}.$$

Обчислення:

$$[\bar{v}] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\{\bar{v}\} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 64 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2} \approx 2,38 \cdot 10^{-2}.$$

Відповідь: $\bar{v} \approx 2,38 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$

Приклад 2. В схемі ділянки ланцюга, приведеного на рис., $R_2 = 15 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$, $I_2 = 0,3 \text{ А}$. Амперметр показує $I = 1 \text{ А}$. Найти опір R_1 .

Дано:

$$R_2 = 15 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 20 \text{ Ом}$$

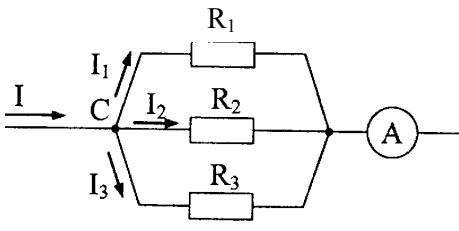
$$I_2 = 0,3 \text{ А}$$

$$R_1 - ?$$

Розв'язання:

Резистори R_1 , R_2 и R_3 сполучені паралельно, значить падіння напруги на них рівне:
 $U = U_1 = U_2 = U_3$ або $I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$.
 Згідно з першим правилом Кирхгофа для вузла C :

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$



Знаючи падіння напруги на резисторі R_3 , можна визначити значення струму, що проходить через нього:

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{I_2 R_2}{R_3} = \frac{0,3 \cdot 15}{20} = 0,225 \text{ A.}$$

Тепер знаходимо I_1 :

$$I_1 = I - I_2 - I_3 = 1 - 0,3 - 0,225 = 0,475 \text{ A.}$$

Отже

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{I_2 R_2}{I_1} = \frac{0,3 \cdot 15}{0,475} \approx 9,47 \text{ Ом.}$$

Відповідь: $R_1 = 9,47 \text{ Ом.}$

Приклад 3. Знайти еквівалентний опір $R_{x,y}$ ланцюга, показаного на рис. Чому дорівнює різниця потенціалів між точками x і y , коли струм, що йде через резистор R_1 дорівнює 50 мА?

Дано:

$$\begin{aligned} R_1 &= 80 \text{ Ом} \\ R_2 &= R_3 = 160 \text{ Ом} \\ R_4 &= 200 \text{ Ом} \\ R_5 &= 90 \text{ Ом} \\ R_6 &= 180 \text{ Ом} \\ R_7 &= 60 \text{ Ом} \\ I_1 &= 50 \text{ мА} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ А} \end{aligned}$$

$$R_{x,y} - ? \quad U_{x,y} - ?$$

Розв'язання:

1) При рішенні задач на складне з'єднання провідників, поступово спрощуватимемо схему ланцюга. Використаємо формулу для паралельного з'єднання провідників і знайдемо опір між крапками x і b :

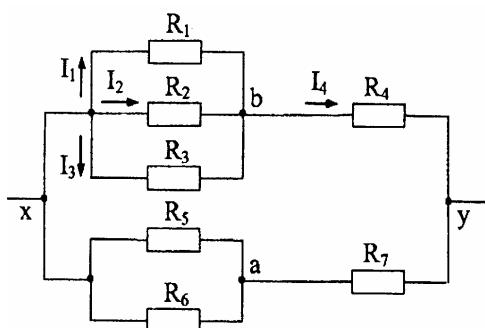
$$\frac{1}{R_{x,b}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{80} + \frac{1}{160} + \frac{1}{160} = \frac{1}{40},$$

звідки $R_{x,b} = 40 \text{ Ом.}$

Аналогічно

$$\frac{1}{R_{x,a}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{90} + \frac{1}{180} = \frac{1}{60},$$

звідки $R_{x,a} = 60 \text{ Ом.}$



Використаємо формулу для послідовного з'єднання провідників і отримаємо:

$$R_{x,b,y} = R_{x,b} + R_4 = 40 + 200 = 240 \text{ Ом};$$

$$R_{x,a,y} = R_{x,a} + R_7 = 60 + 60 = 120 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір між крапками x і y

$$R_{x,y} = \frac{R_{x,b,y} \cdot R_{x,a,y}}{R_{x,b,y} + R_{x,a,y}} = \frac{240 \cdot 120}{240 + 120} = 80 \text{ Ом.}$$

2) Вирішуємо другу частину задачі. Знайдемо різницю потенціалів між крапками x і b :

$$U_{x,b} = I_1 R_1 = 0,05 \cdot 80 = 4 \text{ В.}$$

Знайдемо струм через опори R_2 та R_3 , які сполучені паралельно опору R_1 :

$$I_2 = I_3 = \frac{U_{x,b}}{R_2} = \frac{4}{160} = 0,025 \text{ А.}$$

Струм через опір R_4 буде дорівнювати:

$$I_4 = I_1 + I_2 + I_3.$$

Різниця потенціалів між крапками x і y дорівнює:

$$U_{x,y} = I_4 R_{x,y}.$$

Обчислення:

$$\{ I_4 \} = 0,05 + 0,025 + 0,025 = 0,1 \text{ (А);}$$

$$\{ U_{x,y} \} = 0,1 \cdot 240 = 24 \text{ (В).}$$

Відповідь: $R_{x,y} = 80 \text{ Ом}; U_{x,y} = 24 \text{ В.}$

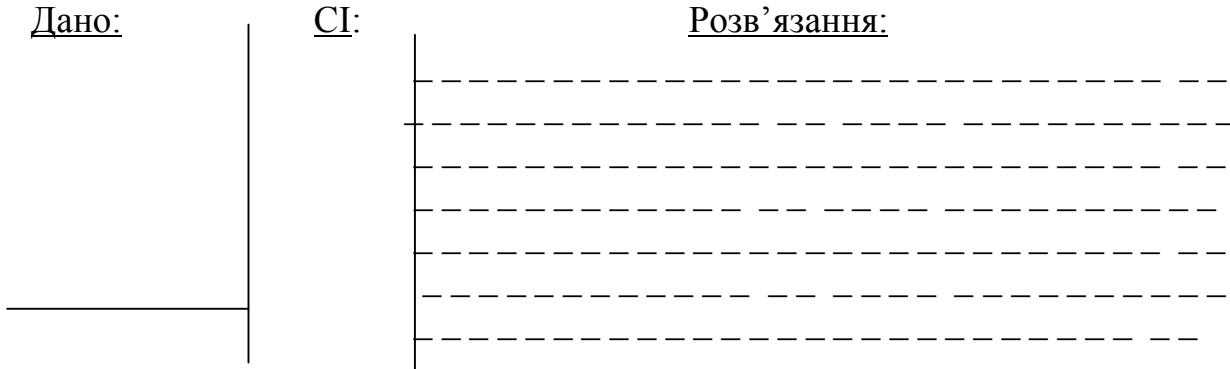
Аудиторне заняття

1. По мідному провіднику поперечним перерізом $0,17 \text{ мм}^2$ тече постійний струм силою $0,025 \text{ А}$. Визначити, яка сила діє на окремі електрони з боку стаціонарного поля.

Дано:

CI:

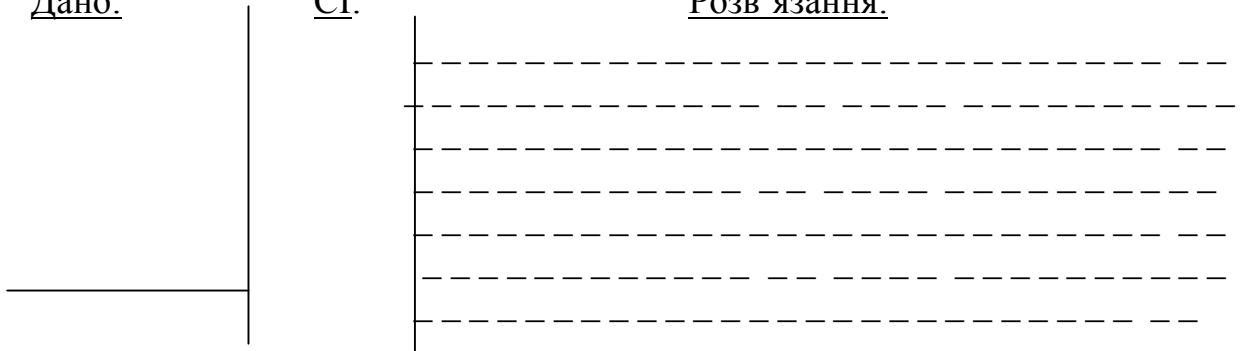
Розв'язання:



Відповідь: $F = 4 \cdot 10^{-22}$ Н.

2. При 20°C опір нитки електричної лампочки дорівнює 20 Ом. Опір нитки працюючої лампочки (після включення її в мережу) дорівнює 166 Ом. Визначити температуру нитки лампочки (нитка зроблена з вольфраму).

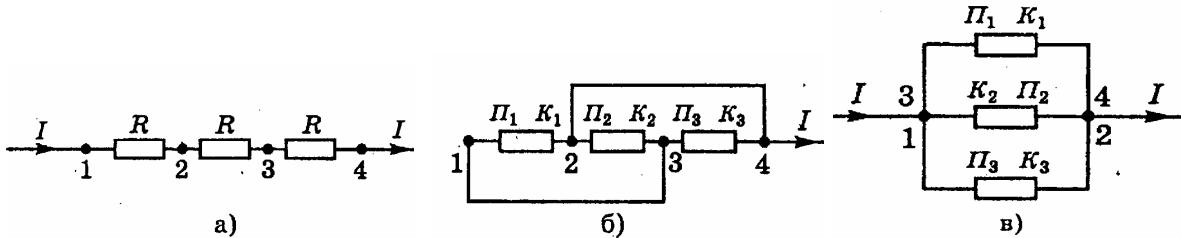
Дано:



Розв'язання:

Відповідь: $t_2 = 1800^\circ\text{C}$.

3. Три одинакових резистори, опором R кожний, з'єднані послідовно (рис., а). Чи зміниться опір кола, якщо замкнути накоротко точки 1 і 3, 2 і 4. (мал., б)?



Дано:

Розв'язання:

Відповідь: $R_{\text{заг}} = R/3$.

Домашнє завдання

1. По провіднику йде постійний струм 10 мА. Скільки електронів проходить через поперечний переріз провідника при направленому русі за 2 хвилини 40 секунд?

Дано:

Cl:

Розв'язання:

Відповідь: $N = 10^{19}$ електронів.

2. В ланцюг з напругою 220 В необхідно включити 15 лампочок, кожна з яких має опір 24 Ом та розрахована на напругу 12 В. Який додатковий опір треба включити послідовно лампочками? Якої сили струм протікає через лампочки?

Дано:

Розв'язання:

_____	<hr/>
-------	---

Відповідь: $R_D = 80$ Ом; $I = 0,5$ А.

Заняття 11

**Закон Ома для повного кола. З'єднання елементів. ЕРС.
Робота і потужність струму**

Приклад 1. Дано електричне коло (рис.). Визначити силу струму в провіднику. Елементи однакові з $\xi = 1,5$ В і $r = 0,5$ Ом кожний. Опір провідників $R_1 = R_4 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 3$ Ом.

Дано:

$$\xi = 1,5 \text{ В}$$

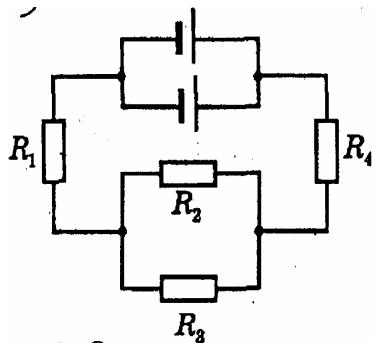
$$r = 0,5 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R_4 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 1 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}$$

$$I_3 - ?$$



Розв'язання:

Провідники R_1 і R_3 з'єднані паралельно, отже

$$\frac{I_3}{I} = \frac{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{R_2}, \quad I_3 = I \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

$$\text{Сила струму в колі } I = \frac{\xi_{\text{дж}}}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 + r_{\text{дж}}}.$$

Оскільки однакові елементи з'єднані паралельно, то

$$\xi_{\text{дж}} = \xi, \quad r_{\text{дж}} = \frac{r}{2}.$$

$$\text{Todі сила струму в колі: } I = \frac{\xi}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 + \frac{r}{2}}$$

Обчислення:

$$[I] = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \text{А};$$

$$\{I\} = \frac{1,5}{2 + \frac{3}{4} + 2 + 0,025} = 0,3;$$

$$\{I_3\} = 0,3 \cdot \frac{1}{4} = 0,075.$$

Відповідь: $I_3 = 75 \text{ мА.}$

Приклад 2. ЕРС батареї $\xi_b = 16$ В, внутрішній опір $r = 3,0$ Ом. Знайти опір зовнішньої ділянки кола, якщо у ній виділяється потужність $P_1 = 16$ Вт. Визначити ККД батареї.

Дано:

$$\begin{aligned}\xi_0 &= 16 \text{ В} \\ r &= 3,0 \text{ Ом} \\ P_1 &= 16 \text{ Вт}\end{aligned}$$

$\eta_1 - ?$

Розв'язання:

Потужність, яка виділяється у зовнішній ділянці кола (корисна потужність), $P_1 = I^2 R$, де R – зовнішній опір. Силу струму визначимо згідно із законом Ома для замкнутого кола:

$$I = \frac{\xi}{R + r}.$$

Таким чином, маємо $P_1 = \frac{\xi^2 R}{(R + r)^2}$, або $R^2 + (2r - \frac{\xi^2}{P_1})R + r^2 = 0$,

це квадратичне рівняння, розв'яжемо відносно R .

ККД матиме два значення, що відповідають двом знайденим значенням зовнішнього опору:

$$\eta_1 = \frac{R_1}{R_1 + r}, \quad \eta_2 = \frac{R_2}{R_2 + r}$$

Обчислення:

$$R^2 + (2 \cdot 3 - \frac{16^2}{16})R + 3^2 = 0;$$

$$R^2 - 10R + 9 = 0; \quad R_1 = 1 \text{ (Ом)}; \quad R_2 = 9 \text{ (Ом)}.$$

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + 3,0} = 0,25; \quad \eta_2 = \frac{9}{9 + 3,0} = 0,75.$$

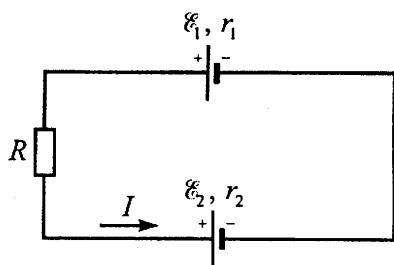
Відповідь: $\eta_1 = 0,25$; $\eta_2 = 0,75$.

Аудиторне заняття

1. У колі є два джерела струму, які з'єднані послідовно (рис.). ЕРС і внутрішній опір першого джерела, відповідно $\xi_1 = 16$ В і $r_1 = 1$ Ом, другого джерела $\xi_2 = 1$ В і $r_2 = 0,5$ Ом. Опір зовнішньої ділянки $R = 3,5$ Ом. Визначити силу струму в колі та напругу на затисках джерела.

Дано:

Розв'язання:



Відповідь: $I = 0,2 \text{ A}$; $U_1 = 1,8 \text{ В}$; $U_2 = 1,1 \text{ В}$.

2. Два споживачі, що мають опори R_1 і R_2 , вмикають у мережу постійного струму спочатку паралельно, а потім – послідовно. В якому випадку споживається більша потужність із мережі? Окремо розглянути випадок, коли $R_1 = R_2$.

Дано:

Розв'язання:

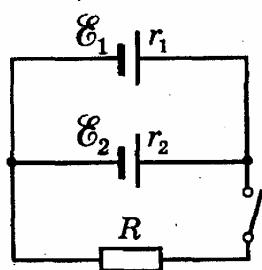
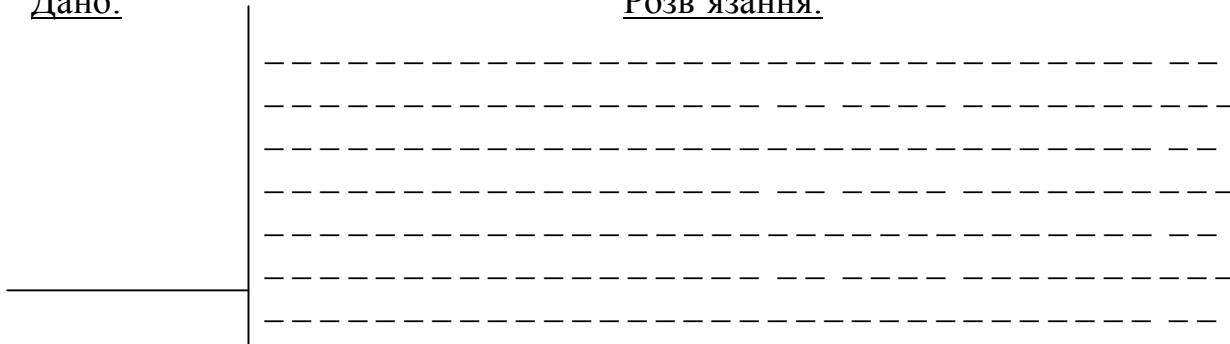
Відповідь: більша потужність споживання при паралельному з'єднанні $R_1/R_2 \geq 4$; при $R_1 = R_2$, $R_1/R_2 = 4$.

Домашнє завдання

1. Два елементи з ЕРС 2 В і 1,5 В, внутрішнім опором $r_1 = r_2 = 0,5$ Ом, з'єднані паралельно. Опір зовнішнього кола $R = 2$ Ом. Визначити силу струму у зовнішньому колі, силу струму в батареї (рис.).

Дано:

Розв'язання:



Відповідь: $I \approx 078$ А; $I_1 = 0,5$ А.

2. Обмотку електродвигуна постійного струму виготовили з проводу, опір якого $R = 2$ Ом. По обмотці двигуна, увімкненого в мережу з напругою $U = 110$ В, проходить струм силою $I = 10$ А. Яку потужність споживає двигун? Який ККД двигуна?

Дано:

Розв'язання:

Відповідь: $P = 1,1 \cdot 10^3$ Вт; $\eta = 0,8$.

Заняття 12

Струми провідності. Струм в електролітах.

Закон електролізу

Приклад 1. Деталь потрібно покрити шаром хрому завтовшки 50 мкм. Скільки часу потрібно для покриття, якщо норма густини струму при хромуванні $2 \text{ кА}/\text{м}^2$? Густина хрому $7200 \text{ кг}/\text{м}^3$. Електрохімічний еквівалент хрому $0,18 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/\text{Кл}$.

Дано:

$\overline{h} = 50$ MKM

$$j = 2 \text{ kA/M}^2$$

$$\rho = 7200 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 0.18 \cdot 10^{-6} \text{ КГ/КЛ}$$

$$\Delta t = ?$$

CI:

$$h = \overline{50} \cdot 10^{-5} \text{ M}$$

$$j = 2 \cdot 10^3 \text{ A/m}^2$$

Розв'язання:

Згідно із законом електролізу

$m = kI\Delta t$, звідки $\Delta t = m / kI$.

Згідно з визначенням густини

струму $j = \frac{I}{S}$, тобто $I = jS$.

тоді $\Delta t = \frac{m}{kJS}$.

Маса шару хрому визначається через густину речовини та об'єм:

$$m = \rho V = \rho Sh.$$

Виконавши підстановку маси в формулу часу, отримаємо:

$$\Delta t = \frac{\rho Sh}{kjS} = \frac{\rho h}{kj}.$$

Обчислення:

$$[\Delta t] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}} = \text{с};$$

$$\{\Delta t\} = \frac{7,2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{1,8 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^3} = 1000.$$

Відповідь: $\Delta t = 1000 \text{ с} = 16,7 \text{ хв.}$

Приклад 2. Скільки часу потрібно пропускати струм силою $I = 18 \text{ А}$ через розчин солі срібла, щоб на $N = 12$ ложках, які служать катодом і мають площину поверхні $S = 50 \text{ см}^2$ кожна, відклався шар срібла завтовшки $h = 0,58 \text{ мм}$? Густина срібла $\rho = 10,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, його молярна маса $M = 108 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$, валентність $n = 1$. Стала Фарадея $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл}/\text{моль}$.

Дано:

$$I = 18 \text{ А}$$

$$N = 12$$

$$S = 50 \text{ см}^2$$

$$h = 0,58 \text{ мм}$$

$$\rho = 10,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$M = 108 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$$

$$n = 1$$

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл}/\text{моль}$$

$$\underline{t - ?}$$

CI:

$$\left| \begin{array}{l} S = 50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \\ h = 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{array} \right.$$

Розв'язання:

Згідно із законом Фарадея,

маса срібла, що відклалась
на ложках, дорівнює:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It, \quad (1)$$

де t – проходження струму.

Крім цього, масу срібла виразимо
формулою: $m = \rho V = \rho NSh$, (2)

де V – об'єм срібла, що виділилося
під час електролізу, h – товщина
шару.

З виразів (1) і (2) отримаємо:

$$t = \frac{nF\rho NSh}{MI}.$$

Обчислення:

$$[t] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{моль} \cdot \text{с}}{\text{моль} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{Кл}} = \text{с};$$

$$\{t\} = \frac{1 \cdot 9,65 \cdot 10^4 \cdot 10,5 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 50 \cdot 10^{-4} \cdot 0,58 \cdot 10^{-3}}{108 \cdot 10^{-3} \cdot 18} = 1,8 \cdot 10^4.$$

Відповідь: $t = 1,8 \cdot 10^4 \text{ с} = 5 \text{ год.}$

Аудиторне заняття

1. Визначити вартість отримання 10 кг рафінованої міді при напрузі 10 В, установленому ККД 75 % і тарифі 19,6 коп (кВт · год). ЕРС поляризації не враховувати.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>	<hr/>	
---	---	--

Відповідь: $S = 23,57 \text{ грн.}$

2. Сила струму при електролізі води була 10 А. За час 25 хвилин було отримано 0,5 літри кисню під тиском $2 \cdot 10^5$ Па. Визначити температуру кисню.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>			

Відповідь: $T = 310$ К, ($t = 37$ °C).

Домашнє завдання

1. При електролізі розчину мідної солі за час 20 хвилин виділилося 1,98 г міді. Знаючи електрохімічний еквівалент міді $0,33 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл, обчислити потужність, яка йде на нагрівання електроліту, якщо його опір 0,8 Ом.

Дано:

CI:

Розв'язання:

<hr/>			

Відповідь: $P = 20$ Вт.

2. Дві електролітичні ванни з розчинами FeCl_3 і Cu SO_4 були підключенні до джерела електрохувлення послідовно. Скільки міді виділиться за час, протягом якого виділилося залізо з масою m_1 ?

Дано:

Розв'язання:

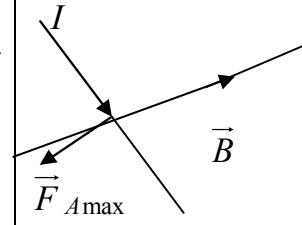
Відповідь: $m_2 = 1,71 m_1$.

9 МАГНЕТИЗМ

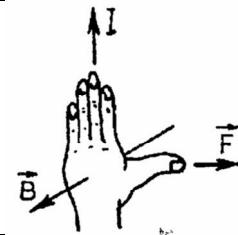
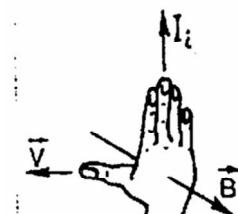
Магнітне поле – це вид матерії, загальною властивістю якої є дія на рухомі тіла або частинки, які мають електричний заряд, та на частинки, які мають магнітний момент.

Магнітна індукція (\vec{B}) – силова характеристика магнітного поля.

Таблиця 9

№	Формула	Назва формули	Назва величин у формулах
1	$B = \frac{F_{L\max}}{qv}$	Модуль магнітної індукції (B) – відношення максимальної сили ($F_{L\max}$), з якою магнітне поле діє на рухомий позитивний заряд (сила Лоренца), до величини цього заряду та швидкості його руху.	$[B] = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл}$ (Тесла).
2	$B = \frac{F_{A\max}}{Il}$	Модуль магнітної індукції (B) – відношення максимальної сили ($F_{A\max}$), з якою магнітне поле діє на провідник з постійним струмом (сила Ампера), до величини сили струму та довжини провідника.	
3	$B = \frac{M_{\max}}{IS}$	Модуль магнітної індукції (B) – відношення максимального моменту сил (M_{\max}), якими магнітне поле обертає рамку з постійним струмом, до сили струму в рамці та площини, обмеженої рамкою.	
4	$\Delta B = \mu\mu_0 \frac{I\Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}$	Закон Біо-Савара-Лапласа: Елементарний вектор ($\vec{\Delta B}$), зв'язаний з нескінченно малим елементом струму, прямо пропорційний величині цього елемента ($I\Delta l$), синусу кута між дотичною до елемента струму і напрямком на дану точку поля та обернено пропорційний квадрату відстані від елемента струму до даної точки (r^2).	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ - магнітна стала.

5	$\mu = \frac{B}{B_0}$	Магнітна проникність середовища (μ) – це число, яке визначає, у скільки разів магнітна індукція поля (B) в середовищі більша (чи менша) від магнітної індукції поля в вакуумі (B_0).	μ - безрозмірна величина.
6	$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$	Магнітна індукція прямолінійного провідника нескінченної довжини зі струмом. Лінії магнітної індукції замкнені в площині, перпендикулярні струму. Напрямок ліній визначається за правилом буравчика.	
7	$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}$	Магнітне поле колового струму у центрі витка.	r - радіус витка.
8	$B = \mu\mu_0 \frac{IN}{l}$	Магнітне поле соленоїда (котушка провідника з постійним струмом).	N - кількість витків; l - довжина провідника.
9	$\vec{F}_L = q [\vec{v} \times \vec{B}]$, $F_L = B q v \sin \alpha$, $\alpha = (\vec{v}, \vec{B})$	Сила Лоренца – дія магнітного поля на рухомий заряд. Напрям дії сили Лоренца на позитивний заряд визначається мнемонічним правилом лівої руки.	
10	$F_{L\max} = B q v$, $R = \frac{m}{q} \frac{v}{B} \left(F_L = \frac{mv^2}{R} \right)$ $F_L = B q v$ $\omega = \frac{qB}{m}$, $T = \frac{2\pi m}{qB}$	Якщо $\vec{v} \perp \vec{B}$, $\sin \alpha(\vec{v}, \vec{B}) = 1$. Якщо \vec{F}_L спрямована перпендикулярно до швидкості руху заряду (\vec{v}), тому: <ul style="list-style-type: none"> - надає зарядженій частинці доцентрового прискорення; - робота \vec{F}_L дорівнює нулю. Заряджена частинка рухається по колу певного радіусу (R).	ω - кутова швидкість; T - період обертання заряду.

11	$v_{\parallel} \cdot T = h$	Якщо \vec{v} спрямована під кутом α до \vec{B} , частинку рухається по гвинтовій лінії з кроком h .	
12	$F_A = B I l \sin \alpha$, $\alpha = (\vec{I}, \vec{B})$	Сила Ампера – дія магнітного поля на струм. Напрямок сили Ампера визначається за правилом лівої руки.	
13	$F_{\parallel} = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2r}$	Взаємодія паралельних струмів нескінченної довжини.	
14	$\Phi = B S \cos \alpha$, $\alpha = (\vec{n}, \vec{B})$	Магнітний потік (Φ), що пронизує поверхню площею S .	$[\Phi] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб}$ (Вебер); \vec{n} - нормаль до площини S .
15	$\xi_{\text{інд}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, $\xi_{\text{інд}} = B l v \sin \alpha$, $\alpha = (\vec{v}, \vec{B})$	ЕРС електромагнітної індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який перетинає контур провідника.	l - довжина провідника.
16	$I_{\text{інд}} = \frac{\xi_{\text{інд}}}{R}$	Індукційний струм – виникає при замкненому провіднику. Напрям $I_{\text{інд}}$ визначається за правилом правої руки.	
17	$\xi_{\text{с.інд}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, $\Delta I > 0 \Rightarrow \xi < 0$, $\Delta I < 0 \Rightarrow \xi > 0$	Самоіндукція – це явище виникнення електрорушійної сили індукції у провіднику при зміні сили струму в ньому самому. Закон самоіндукції.	
18	$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta I}$,	L - індуктивність провідника, власна характеристика провідника.	$[L] = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \text{ Гн}$ (Генрі).

	$L = \xi_{\text{с.інд}} \cdot \frac{\Delta t}{|\Delta I|}$, $L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$	Індуктивність провідника залежить від його розмірів та форми, від кількості витків (N) і магнітних властивостей осердя (μ).	
19	$W_{\text{магн}} = \frac{L I^2}{2}$	Енергія магнітного поля проводника із струмом.	

Методичні рекомендації щодо розв'язання задач

При розв'язанні задач, в яких розглядається провідник або контур зі струмом у магнітному полі, на схематичному рисунку треба вказати напрямок струму, напрям вектора магнітної індукції та сил, які діють на провідник або контур. Якщо за умовою задачі провідник (контур) перебуває в стані рівноваги, як і при розв'язуванні задач на застосування законів статики, слід записати умови рівноваги.

Розв'язуючи задачі, пов'язані з рухом заряджених частинок у магнітному й електричному полях, насамперед складіть рівняння руху матеріальної точки з урахуванням усіх сил, що діють на частинку з боку цих полів.

Для визначення ЕРС індукції з'ясуйте, за рахунок зміни якої величини – вектора магнітної індукції (\vec{B}), площин поверхні (S), обмеженої контуром, або кута ($\alpha = (\vec{n}, \vec{B})$) між вектором \vec{B} і нормаллю до поверхні – відбувається зміна потоку магнітної індукції ($\Delta\Phi$). А потім застосуйте закон електромагнітної індукції. Складвши рівняння на основі цього закону, розв'яжіть його відносно невідомої величини.

Заняття 13 **Магнітне поле. Магнітна індукція**

Приклад 1. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,6 Тл рівномірно рухається провідник довжиною 20 см. По провіднику проходить струм силою 4 А. Швидкість руху провідника 20 см/с, яка спрямована перпендикулярно до вектора магнітної індукції. Знайти роботу по переміщенню провідника за 10 с руху і потужність, яка необхідна для здійснення цього руху.

<u>Дано:</u>	<u>CI:</u>	<u>Розв'язання:</u>
$B = 0,6 \text{ Тл}$	$B = 0,6 \text{ Тл}$	На провідник зі струмом в магнітному
$l = 20 \text{ см}$	$l = 0,2 \text{ м}$	полі діє сила Ампера
$I = 4 \text{ А}$	$I = 4 \text{ А}$	$F_A = BIl \sin \alpha$,
$v = 20 \text{ см/с}$	$v = 0,2 \text{ м/с}$	де α - кут між напрямом вектора магнітної
$\Delta t = 10 \text{ с}$	$\Delta t = 10 \text{ с}$	індукції і напрямом струму. За умовою задачі
$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 90^\circ$, тобто $\sin 90^\circ = 1$.
$A - ?$		Робота по переміщенню провідника
$P - ?$		$A = F_A S$,

де S - шлях провідника в напрямку дії сили Ампера.

З урахуванням рівномірного руху провідника

$$S = v t,$$

де v - швидкість руху провідника, $t = \Delta t$ - час руху провідника.

Виконавши підстановку, отримаємо роботу по переміщенню провідника

$$A = BIlv t.$$

Необхідна потужність для цього руху

$$P = A/t = BIlv.$$

Обчислення:

$$[A] = \text{Tл} \cdot \text{А} \cdot \text{м} \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot \text{С} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{А} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot \text{С} = \text{Дж} ;$$

$$[P] = \text{Tл} \cdot \text{А} \cdot \text{м} \frac{\text{М}}{\text{с}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{С}} \cdot \text{А} \cdot \text{С} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{С}} = \text{Вт} ;$$

$$\{A\} = 0,6 \cdot 4 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 10 = 0,96 ;$$

$$\{P\} = 0,6 \cdot 4 \cdot 0,2 \cdot 1 \cdot 0,2 = 0,096 .$$

Відповідь: $A = 960 \text{ мДж}$; $P = 96 \text{ мВт}$.

Приклад 2. α – частинка, пройшовши прискорюючи різницю потенціалів U , влітає в однорідне магнітне поле, вектор магнітної індукції якого перпендикулярний до її швидкості. Знайти силу, що діє на частинку в магнітному полі, радіус кола та період обертання частинки.

Дано:

α – частинка

$$\alpha = 90^\circ$$

U

B

$$q_a = q$$

$$v_0 = 0$$

m_a

Розв'язання:

Зобразимо рух α – частинки в електричному та магнітному полі (мал.)

Згідно з законом збереження енергії робота кулонівських сил в електричному полі дорівнює зміні кінетичної енергії α – частинки.

$$A_{кул} = \Delta W_k.$$

$$\text{Оскільки } A_{кул} = q_\alpha U,$$

F_L - ?

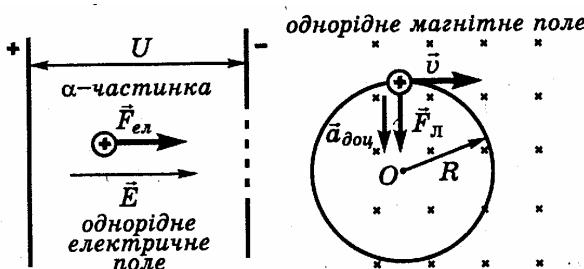
$$\Delta W_k = W_{k2} - W_{k1} = \frac{m_\alpha v^2}{2} - \frac{m_\alpha v_0^2}{2} = \frac{m_\alpha v^2}{2},$$

R - ?

$$\text{то } q_\alpha U = \frac{m_\alpha v^2}{2}.$$

T - ?

Звідси модуль кінцевої швидкості частинки в електричному полі



$$v = \sqrt{\frac{2q_\alpha U}{m}} = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

При русі частинки в однорідному магнітному полі діє сила Лоренца, модуль якої

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

Оскільки $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$, то

$$F_L = qvB = qB \sqrt{\frac{2qU}{m}} = B \sqrt{\frac{2q^3 U}{m}}.$$

Траєкторія руху частинки – коло. Сила Лоренцо відіграє роль доцентрової сили

$$F_L = a_{\text{доц}} \cdot m.$$

Виконавши підстановку модулю сили Лоренцо та доцентрового прискорення, отримаємо

$$qvB = \frac{v^2}{R} m.$$

Звідси радіус кола

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}.$$

Період обертання частинки по колу можна визначити з формулі модуля лінійної швидкості

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

тобто

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}}{\sqrt{\frac{2qU}{m}}} = \frac{2\pi}{B} \sqrt{\frac{2mU \cdot m}{q \cdot 2qU}} = \frac{2\pi m}{Bq}.$$

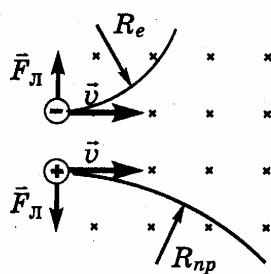
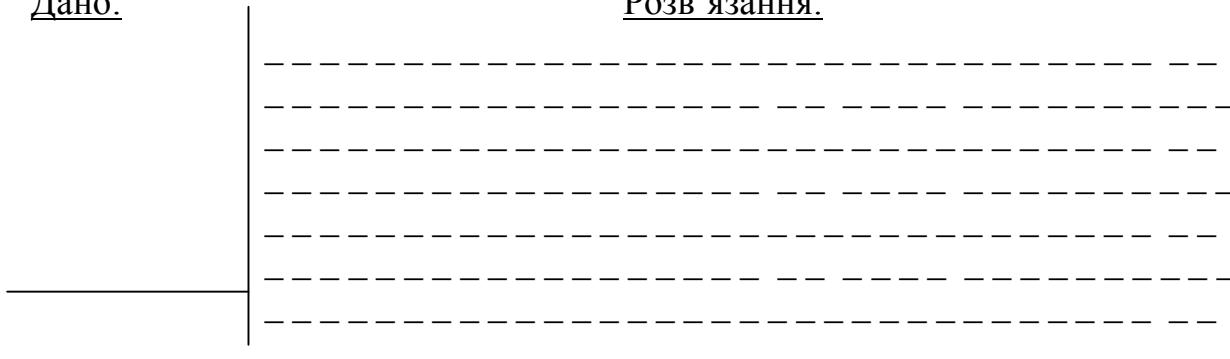
Відповідь: $F_L = B \sqrt{\frac{2q^3 U}{m}}$; $R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$; $T = \frac{2\pi m}{qB}$.

Аудиторне заняття

1. Протон та електрон влітають в однорідне магнітне поле з однаковою швидкістю, перпендикулярно до вектора магнітної індукції. У скільки разів кривизна траєкторії руху протона R_{np} більший за радіус кривизни траєкторії руху електрона R_e - ?

Дано:

Розв'язання:



Відповідь: $R_{np} / R_e = 1800$ разів.

2. Струм силою I , що проходить по дротяному кільцю з міді перерізом S , створює в центрі кільця індукцію магнітного поля \vec{B} . Визначити різницю потенціалів між кінцями дроту, що утворює кільце.

Дано:

Розв'язання:

The diagram shows a horizontal line segment representing a wire forming a circle. From its center, several horizontal dashed lines extend outwards, representing the magnetic field lines of the loop.

Відповідь: $\Delta\varphi = \frac{I^2 \rho \cdot \pi \mu \mu_0}{S \cdot B}$.

Домашнє завдання

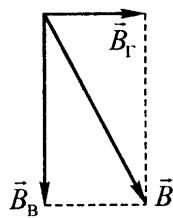
1. Літак летить горизонтально зі швидкістю $v = 1200$ км/год. Визначити різницю потенціалів, яка виникає між кінцями крил, якщо вертикальна складова індукції магнітного поля Землі $B_v = 5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл. Розмах крил літака $l = 40$ км. Яка максимальна різниця потенціалів може виникнути під час польоту літака? Горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі $B_r = 2,0 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Дано:

CI:

Розв'язання:

The diagram shows a horizontal line segment representing an airplane wing. From its center, several vertical dashed lines extend downwards, representing the magnetic field lines of the Earth's magnetic field.



Відповідь: $U_m = 0,72$ В.

2. Електрон влітає в однорідне поле у вакуумі зі швидкістю $v = 1 \cdot 10^7$ м/с, спрямованого перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Визначити траєкторію руху електрона у магнітному полі, якщо модуль вектора магнітної індукції $B = 5 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Дано:

Розв'язання:

Заняття 14

Електромагнітна індукція. ЕРС індукції

Приклад 1. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,5 Тл знаходиться котушка, що має 300 витків. Опір котушки становить 40 Ом, площа перерізу 16 см². Котушка розташована таким чином, що її вісь створює з напрямком ліній магнітної індукції 60°. Який заряд пройде по котушці при зникненні магнітного поля?

Дано:

$$N = 300$$

$$B = 0,4 \text{ Тл}$$

$$S = 16 \text{ см}^2 = 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$R = 40 \text{ Ом}$$

$$\Delta q - ?$$

Розв'язання:

ЕРС індукції, що виникає в котушці

$$\xi_{ind} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{\Delta t}.$$

Початковий магнітний Φ_1 через котушку

$$\Phi_1 = \Phi_0 N \cos \alpha = BSN \cos \alpha,$$

де Φ_0 - магнітний потік через один виток котушки, розташований перпендикулярно лініям індукції.

Після зникнення магнітного поля $\Phi_2 = 0$.

Тоді

$$\xi_{ind} = \frac{\Phi_1}{\Delta t} = \frac{BSN \cos \alpha}{\Delta t}.$$

Оскільки

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

то

$$\Delta q = I \Delta t = \frac{BSN \cos \alpha \cdot \Delta t}{\Delta t \cdot R} = \frac{BSN \cos \alpha}{R}.$$

Обчислення:

$$[\Delta q] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Ом}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{Ом}} = \frac{\text{Дж}}{\text{В}} = \text{Кл};$$

$$\{\Delta q\} = \frac{0,4 \cdot 16 \cdot 10^{-4} \cdot 300 \cdot \frac{1}{2}}{40} = 2,4 \cdot 10^{-3}.$$

Відповідь: $\Delta q = 2,4 \text{ мКл.}$

Приклад 2. В магнітному полі, індукція якого $5 \cdot 10^{-2}$ Тл, обертається стержень довжиною 1м зі сталою кутовою швидкістю 20 рад/с. Вісь обертання проходить через кінець стержня і паралельна до силових ліній магнітного поля. Визначте ЕРС індукції, що виникає у стержні.

Дано:

$$B = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$\omega = 20 \text{ рад/с}$$

$$\xi_{i\text{нд}} - ?$$

Розв'язання:

Стержень, обертаючись, перетинає лінії магнітної індукції.

При кожному оберті він перетинає магнітний потік

$$\Phi_1 = BS = B\pi l^2.$$

Протягом однієї секунди, за яку стержень обернеться v разів, він перетинає магнітний потік у v разів більший, ніж Φ_1 .

Оскільки зміна потоку відбувається за 1 с, то вона і визначає ЕРС індукції, яка дорівнює

$$\xi_{i\text{нд}} = -B\pi l^2 v.$$

Частота обертання v і кутова швидкість ω пов'язані між собою співвідношенням

$$\omega = 2\pi v,$$

звідки

$$v = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Отже маємо

$$\xi_{i\text{нд}} = -B\pi l^2 \frac{\omega}{2\pi} = -\frac{Bl^2 \omega}{2}.$$

Обчислення:

$$[\xi_{i\text{нд}}] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{H}{A \cdot m} \cdot \frac{\text{м}^2}{c} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$\{ \xi_{i\text{нд}} \} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 20}{2} = -0,5.$$

Відповідь: $\xi_{i\text{нд}} = -0,5 \text{ В.}$

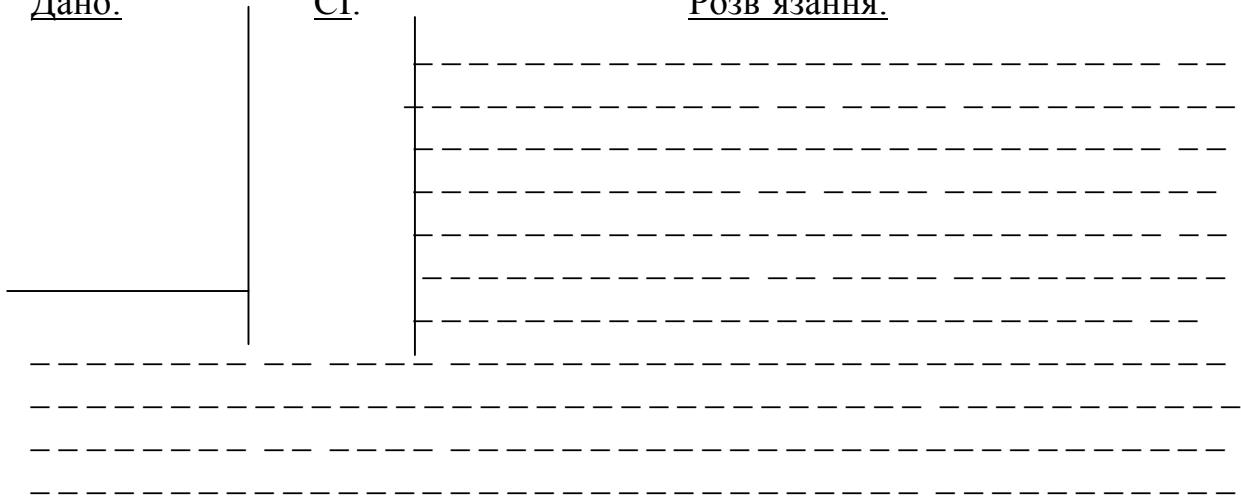
Аудиторне заняття

1. У магнітному полі з індукцією $B = 0,1$ Тл вміщено контур, виготовлений у вигляді колового витка радіусом $R = 34$ см. Виток зроблено з мідного дроту, площа поперечного перерізу якого $S = 1 \text{ мм}^2$. Нормаль до площини витка збігається з лініями індукції поляж. Який заряд пройде через поперечний переріз витка при зникненні поля?

Дано:

CI:

Розв'язання:



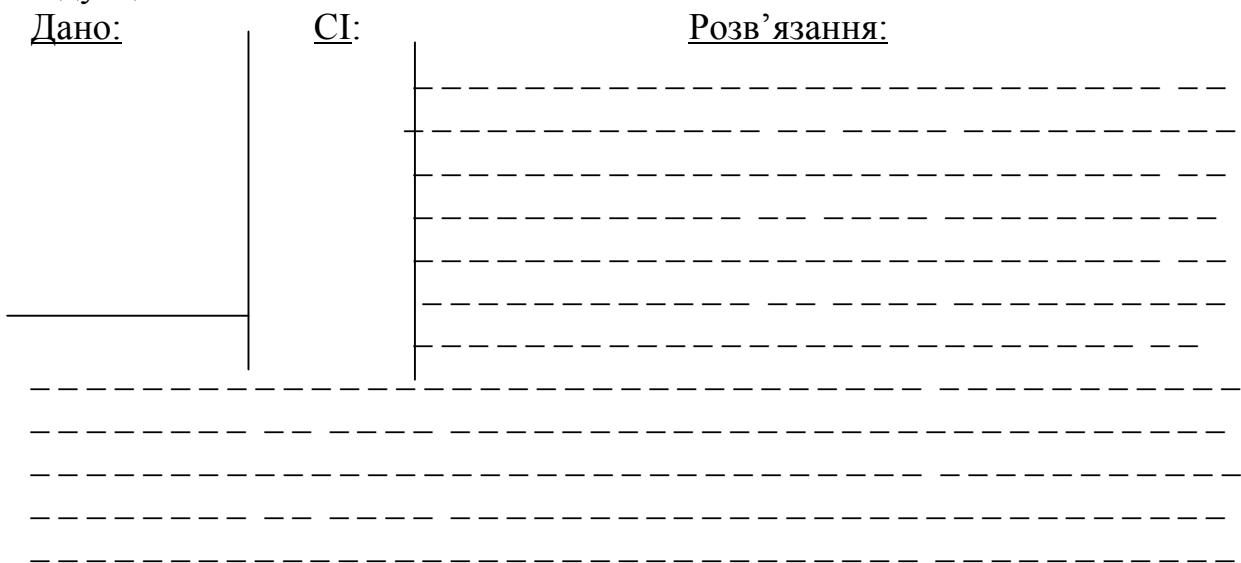
Відповідь: $q = 0,1$ Кл.

2. Визначити ЕРС індукції в провіднику з довжиною. Активної частини 0,25 м, який переміщається в однорідному магнітному полі, що має індукцію 8 мТл, з швидкістю 5 м/с під кутом 300 до вектора магнітної індукції.

Дано:

CI:

Розв'язання:



Відповідь: $\xi_{\text{інд}} = 5$ мВ.

Домашнє завдання

1. Який заряд q пройде через поперечний переріз витка, опір якого $R = 0,03$ Ом, при зменшенні магнітного потоку всередині витка $\Delta\Phi = 12$ мВб?

Дано:

CI:

Розв'язання:

$$\text{Відповідь: } q = \frac{\Delta\Phi}{R} = 400 \text{ мКл.}$$

2. Скільки витків має котушка площею поперечного перерізу 50 см^2 , щоб унаслідок зміни магнітної індукції від $0,2$ до $0,3$ Тл протягом 4 мс у ній збуджувалась ЕРС 10 В?

Дано:

CI:

Розв'язання:

$$\text{Відповідь: } N = 80.$$

Заняття 15
Самоіндукція. Індуктивність.
Енергія магнітного поля струму

Приклад 1. По катушці, індуктивність якої $L = 0,05 \text{ мГн}$, тече струм $I = 0,8 \text{ А}$. При вимиканні струм зменшується практично до нуля за час $\Delta t = 160 \text{ мкс}$. Визначити середнє значення ЕРС самоіндукції, що виникає в катушці, та енергію магнітного поля катушки.

<u>Дано:</u>	<u>CI:</u>	<u>Розв'язання:</u>
$L = 0,05 \text{ мГн}$	$L = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$	ЭДС самоіндукції
$I = 0,8 \text{ А}$		$\xi_{\text{с.інд}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.
$\Delta t = 160 \text{ мкс}$	$\Delta t = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$	Енергія магнітного поля катушки
$\xi_{\text{с.інд}} - ?$		$W = \frac{LI^2}{2}$.
$W - ?$		

Обчислення:

$$[\xi_{\text{с.інд}}] = \frac{\Gamma_{\text{Н}} \cdot \text{А}}{\text{С}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \text{В};$$

$$[W] = \Gamma_{\text{Н}} \text{А}^2 = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^2}{\text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}}{\text{с}} = \text{В} \cdot \text{Кл} = \text{Дж};$$

$$\{\xi_{\text{с.інд}}\} = -5 \cdot 10^{-5} \frac{(0 - 0,8)}{1,6 \cdot 10^{-4}} = 0,25;$$

$$\{W\} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot (0,8)^2}{1,6 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^3.$$

Відповідь: $\xi_{\text{с.інд}} = 0,25 \text{ В}$; $W = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

Приклад 2. Визначити швидкість зміни сили струму в катушці, індуктивність якої $L = 100 \text{ мГн}$, якщо в ній виникла ЕРС самоіндукції $\xi_{\text{с.інд}} = 80,0 \text{ В}$.

<p><u>Дано:</u></p> $L = 100 \text{ мГн}$ $\xi_{\text{с.інд}} = 80,0 \text{ В}$ $v - ?$	<p><u>CI:</u></p> $L = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$	<p><u>Розв'язання:</u></p> <p>Знаходимо</p> $|\xi_{\text{с.інд}}| = L \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|,$ <p>де $\left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|$ - модуль швидкості зміни сили струму.</p>
---	--	--

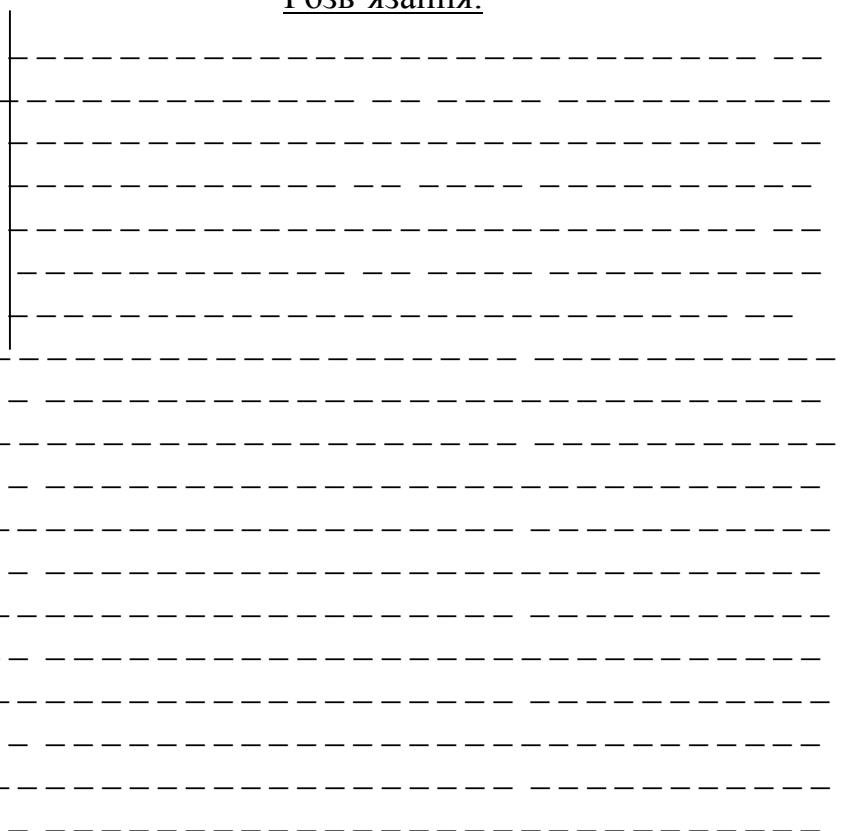
Звідси:

$$\left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = \frac{|\xi_{\text{с.інд}}|}{L}, \quad \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = 800 \text{ А/с.}$$

Відповідь: $\left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = 800 \text{ А/с.}$

Aудиторне заняття

1. Визначити індуктивність провідника, в якому рівномірна зміна сили струму на 2 А протягом 0,25 с збуджує ЕРС самоіндукції 20 мВ.

<p><u>Дано:</u></p>	<p><u>CI:</u></p> 	<p><u>Розв'язання:</u></p>
---------------------	--	----------------------------

Відповідь: $L = 2,5 \text{ мГн.}$

2. У катушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї катушки? Як зміниться енергія поля, коли сила струму зменшиться удвічі?

Дано:

Розв'язання:

Відповідь: $W = 120$ Дж; зменшиться у 4 рази.

Домашнє завдання

1. Який магнітний потік виникає в контурі індуктивністю 0,2 мГн при силі струму 10 А?

Дано:

CI:

Розв'язання:

Відповідь: $\Phi = 2$ мВб.

2. Визначити енергію магнітного поля соленоїда, в якому при силі струму 10 А виникає магнітний потік 0,5 Вб.

Дано:

Розв'язання:

<hr/>	

Відповідь: $W = 2,5$ Дж.

Перелік навчальної літератури

1. Коршак Є.В., Фізика 10 кл.: Підручник для загально освіт. навч. закл. / Коршак Є.В., Ляшенко О.І., Савченко В.Ф. –К; Ірпень: ВТФ “Перун”, 2004. – 296 с.
2. Гончаренко С.У., Фізика 10 К. -К.: " Освіта ", 2002 . - 319 с.
3. Римкевич А.П., Збірник задач з фізики для 9-11 кл. середн. школи. 12 - те вид, Х., ББК: 2006. - 208 с.
4. Соколович Ю.А., Богданова Г.С. Фізика: Довідник з прикладами розв’язування задач / Соколович Ю.А., Богданова Г.С.- 2-ге вид. перероб. – Х.: Веста: Видавництво «Ранок», 2006. - 464с.
5. Савченко М.О. Розв’язування задач з фізики: Навчальний посібник / Пер. з рос. ПФ. Пістуна. - Тернопіль: Навчальна книга - Богдан, 2004. - 504 с.

Додатки

Грецький і латинський алфавіти

Буква	Назва букви	Буква	Назва букви
Грецький алфавіт			
Αα	альфа	Νν	ню
Ββ	бета	Ξξ	ксі
Γγ	гамма	Οο	омікрон
Δδ	дельта	Ππ	пі
Εε	епсилон	Ρρ	ро
Ζζ	дзета	Σσ	сигма
Ηη	ета	Ττ	тау
Θθ	тета	Υυ	іпсилон
Ιι	йота	Φφ	фі
Κχ	каппа	Χχ	хі
Λλ	ламбда	Ψψ	псі
Μμ	мю	Ωω	омега
Латинський алфавіт			
Aa	а	Nn	ен
Bb	бе	Oo	о
Cc	це	Pp	пе
Dd	де	Qq	ку
Ee	е	Rr	ер
Ff	еф	Ss	ес
Gg	ѓе, же	Tt	те
Hh	га, аш	Uu	у
Ii	і	Vv	ве
Jj	йот, жи	Ww	дубль-ве
Kk	ка	Xx	ікс
Ll	ель	Yy	ігрек
Mm	ем	Zz	зет (зета)

Позначення фізичних величин

Шлях (довжина)	l
Висота	h
Переміщення	\vec{S}
Координата	x, y, z
Площа	S
Об'єм	V
Час	t, τ
Маса	m, M
Вага	\vec{P}
Тиск	p
Імпульс	\vec{p}
Сила	$\vec{F}, \vec{N}, \vec{T}$
Момент сили	\vec{M}
Момент імпульсу	\vec{L}
Момент інерції	I
Швидкість	\vec{v}, \vec{u}
Швидкість кутова	$\dot{\omega}$
Прискорення	\vec{a}
Прискорення вільного падіння	\vec{g}
Прискорення кутове	$\vec{\epsilon}$
Період коливань	T
Частота коливань	v, f
Частота обертання	n
Частота кутова	ω
Фаза коливань (зсув фаз)	Φ
Кількість речовини	v
Кількість частинок	N
Концентрація частинок	n
Молярна маса	M
Термодинамічна температура	T
Температура за міжнародною шкалою	t, θ
Робота	A
Потужність	N, P
Енергія	E, W
Внутрішня енергія	U
Густина енергії	ω
Кількість теплоти	Q
Питома теплоємність	c
Теплоємність тіла	C
Питома теплота плавлення	λ

Питома теплота пароутворення	L
Питома теплота згоряння	q
Температурний коефіцієнт	α
Поверхневий натяг	σ
Механічна напруга	σ
Жорсткість	k
Модуль пружності	E
Коефіцієнт тертя	μ
В'язкість	η
Абсолютна вологість	p, ρ
Відносна вологість	φ
Валентність	n
Коефіцієнт корисної дії	к.к.д., η
Плоский кут	α, Φ
Тілесний кут	Ω
Електричний заряд	q, Q
Густина електричного заряду	σ
Напруженість електричного поля	\vec{E}
Потенціал електричного поля	Φ
Різниця потенціалів	$\Phi_1 - \Phi_2$
Сила струму	I
Густина струму	j
Електричний опір	r, R
Напруга	U
Питомий опір	ρ
Питома електропровідність	γ
Ємнісний опір	X_c
Індуктивний опір	X_L
Повний опір змінному струму	Z
Електрорушійна сила	\mathcal{E}
Електрична ємність	C
Індуктивність	L
Магнітна індукція	\vec{B}
Магнітний потік	Φ
Магнітна проникність	μ
Діелектрична проникність	ϵ
Інтенсивність	I
Яскравість	B
Світловий потік	Φ
Освітленість	E
Сила світла	I
Лінійне збільшення	Γ
Кутове збільшення	β

Основні одиниці СІ

Найменування величини	Одиниця		
	Найменування	Позначення	Визначення
1	2	3	4
Довжина	метр	м	Метр дорівнює довжині 1650763,73 хвилі у вакуумі випромінювання, відповідного переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криptonу-86
Маса	кілограм	кг	Кілограм дорівнює масі міжнародного еталону кілограма
Час	секунда	с	Секунда дорівнює 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133
Сила електричного струму	ампер	А	Ампер дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і мізерно малої площині перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликав би на ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Температура	Кельвін	К	Кельвін дорівнює $1/273,16$ частини термодинамічної температури тройної точки води
Кількість речовини	Моль	моль	Моль дорівнює кількості речовини системи, яка має стільки ж структурних елементів (атоми, молекули, іони та ін. частинки), скільки є атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг
Сила світла	Кандела	кд	Кандела дорівнює силі світла, яке випускається з поверхні площею $1/600\,000\text{ m}^2$ повного випромінювання в пірпендикулярному напрямку при температурі випромінювача, що дорівнює температурі затвердіння платини при тиску 101 325 Па

Додаткові одиниці СІ

Найменування величини	Визначальне рівняння	Одиниця		
		Найменування	Позначення	Визначення
Плоский кут	$\phi = \frac{l}{R}$	радіан	рад	Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу
Тілесний кут	$\Omega = \frac{S}{R^2}$	стерадіан	ср	Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площину, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери

Похідні одиниці

Найменування величини	Визначальне рівняння	Одиниця	
		Найменування	Позначення
1	2	3	4
Густина	$\rho = \frac{m}{V}$	кілограм на кубічний метр	кг/м ³
Тиск	$p = \frac{F}{S}$	паскаль	Па
Імпульс тіла (кількість руху)	$p = mv$	кілограм-метр на секунду	кг·м/с
Імпульс сили	$F\Delta t$	ньютон-секунда	Н·с
Робота	$A = F \cdot S \cos \alpha$	джауль	Дж
Потужність	$N = \frac{A}{t}$	ватт	Вт
Момент сили	$M = Fd$	ニュто́н-метр	Н·м
Механічна напруга	$\sigma = \frac{F}{S}$	паскаль	Па
Модуль Юнга	$E = \frac{\sigma}{|\epsilon|}$	паскаль	Па
Жорсткість	$k = \frac{F}{\Delta l}$	ニュто́н на метр	Н/м
Площа	$S = a^2$	квадратний метр	м ²

1	2	3	4
Об'єм	$V = a^3$	кубічний метр	м^3
Швидкість	$v = \frac{S}{t}$	метр за секунду	$\text{м}/\text{s}$
Прискорення	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	метр за секунду в квадраті	$\text{м}/\text{s}^2$
Частота періодичного процесу коливань (випромінювання)	$\nu = \frac{1}{T}$	герц	Гц
Частота обертання	$n = \frac{1}{T}$	секунда в мінус першому ступені	с^{-1}
Кутова швидкість	$\omega = \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$	радіан за секунду	$\text{рад}/\text{s}$
Кутове прискорення	$\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$	радіан на секунду в квадраті	$\text{рад}/\text{s}^2$
Сила	$F = ma$	ньютон	Н
Молярна маса	$M = \frac{m}{v}$	кілограм на моль	$\text{кг}/\text{моль}$
Температурний коефіцієнт лінійного, об'ємного розширення і тиску	$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t}$ $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t}$ $\beta = \frac{\Delta p}{p_0 \Delta T}$	кельвін у мінус першому ступені	K^{-1}
Кількість теплоти	$Q = A' + \Delta U$	джауль	Дж
Питома теплота згоряння палива	$q = \frac{Q}{m}$	джауль на кілограм	$\text{Дж}/\text{кг}$
Теплоємність системи	$C = \frac{Q}{\Delta T}$	джауль на кельвін	$\text{Дж}/\text{K}$
Питома теплоємність	$c = \frac{Q}{m \Delta T}$	джауль на кілограм-кельвін	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
Поверхневий натяг	$\alpha = \frac{F}{l}$	ニュтона на метр	$\text{Н}/\text{м}$
Кількість електрики, електричний заряд	$\Delta q = I \Delta t$	кулон	Кл

1	2	3	4
Діелектрична проникність	$\epsilon = \frac{F_0}{F}$	величина безрозмірна	
Електрична стала	$\epsilon_0 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 F r^2}$	фарад на метр	$\Phi/\text{м}$
Напруженість електричного поля	$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta d}$	вольт на метр	$\text{В}/\text{м}$
Електричний потенціал	$\phi = \frac{W_{\Pi}}{q}$	вольт	В
Електрична ємність	$C = \frac{q}{\Delta\phi}$	фарад	Φ
Електрична напруга	$U = \frac{A}{q}$	вольт	В
Електричний опір	$R = \frac{U}{I}$	ом	Ом
Питомий опір	$\rho = \frac{RS}{l}$	ом·метр	$\text{Ом}\cdot\text{м}$
Магнітний потік	$\Phi = B \cdot S \cos\alpha$	вебер	Вб
Індуктивність, взаємна індуктивність	$L = \frac{\Phi}{I}$	генрі	Гн
Температурний коефіцієнт опору	$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho_0 T}$	кельвін у мінус першому ступені	К^{-1}
Електрохімічний еквівалент	$k = \frac{m}{q}$	кілограм на кулон	$\text{кг}/\text{Кл}$
Магнітний момент електричного струму	$p_m = IS$	ампер на квадратний метр	$\text{А}\cdot\text{м}^2$
Магнітна індукція	$B = \frac{M_{\max}}{IS}$	tesла	Тл
Відносна магнітна проникність	$\mu = \frac{B}{B_0}$	величина безрозмірна	
Магнітна стала	$\mu_0 = \mu_a/\mu$	генрі на метр	$\text{Гн}/\text{м}$
Період	T	секунда	с
Циклічна частота	$\omega = 2\pi\nu$	секунда в мінус першому ступені	с^{-1}

1	2	3	4
Фаза коливання	$\phi = \omega t + \phi_0$	радіан	рад
Інтенсивність хвиль	$I = \frac{\Phi}{S}$	ватт на квадратний метр	$\text{Вт}/\text{м}^2$
Інтенсивність звука	$I = \frac{W}{St}$	ватт на квадратний метр	$\text{Вт}/\text{м}^2$
Світловий потік	$\Delta\Phi = I\Delta\Omega$	люмен	лм
Освітленість	$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$	люмен на квадратний метр	$\text{лм}/\text{м}^2$
Яскравість	$B = \frac{I}{S \cos \phi}$	кандела на квадратний метр	$\text{кд}/\text{м}^2$

Префікси для утворення десяткових часткових і кратних одиниць

Найменування приставки	Відношення до основної одиниці	Позначення	
		українське	міжнародне
атто	10^{-18}	а	a
фемто	10^{-15}	ф	f
піко	10^{-12}	п	p
нано	10^{-9}	н	n
мікро	10^{-6}	мк	μ
міллі	10^{-3}	м	m
санти	10^{-2}	с	c
деци	10^{-1}	д	d
дека	10	да	da
гекто	10^2	г	h
кіло	10^3	к	K
мега	10^6	M	M
гіга	10^9	Г	G
тера	10^{12}	Т	T
пета	10^{15}	П	P
екса	10^{18}	Е	E

Фізичні сталі

Гравітаційна стала	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Стала Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$
Елементарний електричний заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}/\text{м}$
Швидкість світла у вакуумі	$c = 299792458 \text{ м}/\text{с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$
Стала Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Атомна одиниця маси	$1 \text{ а.о.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Співвідношення маси і енергії	$1 \text{ а.о.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ МeВ}$
Маса спокою електрона	$m_0 = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Стала Фарадея	$F = 9,648456 \cdot 10^4 \text{ Кл}/\text{моль}$
Молярний об'єм ідеального газу за нормальних умов	$V = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Маса спокою протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Маса Землі	$M_3 \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радіус Землі	$R_3 \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$

Деякі астрономічні величини

Радіус Землі	середній	$6\,371\,000 \text{ м}$
	полярний	$6\,356\,912 \text{ м}$
	екваторіальний	$6\,378\,388 \text{ м}$
Маса Землі	. . . . .	$6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Середня густота Землі	. . . . .	$5,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$
Середня відстань від Землі до Сонця	. . . . .	$1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Радіус Сонця	. . . . .	$6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$
Маса Сонця	. . . . .	$1,97 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Радіус Місяця	. . . . .	$1,735 \cdot 10^6 \text{ м}$
Маса Місяця	. . . . .	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Середня відстань від Місяця до Землі	. . . . .	$3,84 \cdot 10^8 \text{ м}$
Кутова швидкість обертання Землі навколо своєї осі	. . . . .	$7,272 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$

РОБОЧИЙ ЗОШИТ

з дисципліни «ФІЗИКА»
для слухачів до вузівської підготовки
частина 2

Укладачі:

доцент кафедри довузівської підготовки Расторгуєва Т. Є.,
викладач кафедри довузівської підготовки Галич Є. А.,
ст. лаб. кафедри довузівської підготовки Хохлова О. П.

Підп. по друку
Умовн. друк. арк.

Формат
Тираж

Папір
Зам. №

Надруковано з готового оригінал – макета

Одеський державний екологічний університет
65114, Одеса, вул. Львівська, 15
