

МОДУЛЬ 2. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА Й ТЕРМОДИНАМІКА. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

2.1. НАВЧАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА Й ТЕРМОДИНАМІКА

2.1.1. Основні поняття молекулярної фізики

Термодинамічною системою (ТДС) називають сукупність макроскопічних тіл, які обмінюються енергією й речовиною між собою і з іншими тілами зовнішнього середовища. ТДС складається з величезної кількості структурних одиниць (молекул, атомів), але її стан можна характеризувати макроскопічними параметрами: густиною (ρ), тиском (P), об'ємом (V), температурою (T).

ТДС називають *замкнутою, або ізольованою*, якщо відсутній будь-який обмін енергією й речовиною між нею і зовнішнім середовищем. Систему називають *ізольованою в тепловому відношенні (адіабатично ізольована система)*, якщо відсутній теплообмін між нею та зовнішнім середовищем.

Якщо за незмінних зовнішніх умов параметри ТДС в усіх точках мають певні значення і не потребують для свого підтримання жодного процесу у зовнішньому середовищі, тоді стан системи називають *рівноважним*. Стан ТДС, в якому хоча б один з параметрів не має певного значення, називають *нерівноважним*.

Термодинамічним процесом називають перехід ТДС з одного стану в інший. Такий перехід завжди пов'язаний з порушенням рівноваги системи. Кожен параметр починає змінювати свої значення з часом. Але, якщо процес проходить досить повільно (теоретично – нескінченно повільно), то в кожному момент часу певні значення параметрів встигають поширитись на всю систему, і між параметрами встановлюються певні співвідношення. Такий процес називають *квазістатичним*, а послідовні стани, в які переходить система, вважають рівноважними. При зміні напряму рівноважного процесу на обернений система буде проходити через ті самі рівноважні стани, що й у прямому напрямі, але у зворотному порядку. Тому квазістатичні процеси називають також *оборотними*.

Таким чином, *оборотним* називають рівноважний процес, за якого система повертається в початковий стан і при цьому у навколишньому середовищі не відбувається жодних змін. Ті процеси, які не задовольняють цій умові, називають *необоротними*.

Процес, за якого система після низки змін повертається в початковий стан, називають *коловим процесом*, або *циклом*. Колові процеси бувають як оборотними, так і необоротними.

Маси атомів і молекул характеризують не лише їх абсолютними значеннями (у кілограмах), а і відносними безрозмірними величинами: A_r – *відносна атомна маса*; M_r – *відносна молекулярна маса*. За атомну одиницю маси (а.о.м) приймають масу $m_{\text{а.о.м}}$, що дорівнює 1/12 маси ізотопу вуглецю ^{12}C

$$m_{\text{а.о.м}} = \frac{\text{маса ізотопу } ^{12}\text{C} = m(^{12}\text{C})}{12} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Відносну молекулярну масу визначають за формулою

$$M_r = \frac{m_0}{m_{\text{а.о.м}}} = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m(^{12}\text{C})},$$

де m_0 – абсолютне значення маси певної молекули, кг.

Відносна молекулярна маса M_r є безрозмірною величиною, яка показує у скільки разів маса молекули певної речовини більше атомної одиниці маси. Аналогічною формулою визначається і A_r – відносна атомна маса, необхідно лише масу молекули m_0 замінити на масу атома (відносні атомні маси наведені в таблиці Менделєєва). Маса будь-якої молекули визначається добутком $m_0 = m_{\text{а.о.м}} \cdot M_r$.

Для характеристики ТДС необхідно знати кількість речовини в ній. У системі СІ ця кількість речовини виражається в молях.

Моль – кількість речовини в системі, в якій є стільки структурних елементів (атомів, молекул тощо), скільки є атомів у 0,012 кг ізотопу вуглецю ^{12}C (поряд з молем використовують 1 кіломоль = 1000 молів). Отже, за означенням, моль будь-якої речовини містить однакову кількість структурних елементів. Таке число називають *сталю Авогадро*:

$$N_A = \frac{0,012}{m(^{12}\text{C})} = \frac{0,012}{12 \cdot m_{\text{а.о.м}}} = \frac{10^{-3}}{m_{\text{а.о.м}}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

З цієї формули маємо $m_{\text{а.о.м}} \cdot N_A = 10^{-3}$ кг/моль.

Один моль будь-якої речовини в нормальних умовах (при $T = 273$ К і $P = 1,01 \cdot 10^5$ Па) має один і той самий об'єм – $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³/моль і однакову N_A кількість молекул.

Молярна маса μ – це маса речовини, взята у кількості одного моля. Молярна маса дорівнює добутку маси однієї молекули m_0 даної речовини на число Авогадро N_A :

$$\mu = m_0 \cdot N_A = m_0 \cdot 10^{-3} / m_{\text{а.о.м}} = 10^{-3} \cdot M_r \text{ кг/моль.}$$

Відносна молекулярна маса визначається сумою відносних мас атомів, що входять до складу молекули. Так, наприклад, молярна маса вуглекислого газу CO_2 становить $44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, тому що його відносна молекулярна маса $M_r(\text{CO}_2) = M_r(\text{C}) + M_r(\text{O}_2) = 12 + 2 \cdot 16 = 44$.

Часто необхідно знати *кількість молей* ν у певній речовині, для чого масу речовини ділять на її молярну масу:

$$\nu = \frac{m}{\mu}$$

Коли відомо кількість молей у певній речовині, можна легко визначити загальну кількість молекул, N :

$$N = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A.$$

Кількість молекул в одиниці об'єму називають їх *концентрацією*:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{m N_A}{\mu V} = \frac{\rho}{m_0},$$

де ρ – густина цієї речовини.

У системі СІ тиск вимірюється в паскалях (Па), $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Оскільки ця величина досить мала, то користуються величиною в 10^5 більшою, яка носить назву бар: $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$. Іноді користуються фізичною атмосферою (атм), яка дорівнює тиску стовпчика ртуті висотою 760 мм. Ураховуючи величину густини ртуті $13,595 \text{ г/см}^3$ (13595 кг/м^3) і прискорення вільного падіння $9,806 \text{ м/с}^2$, отримуємо величину цієї одиниці тиску: $1 \text{ атм} = 101323 \text{ Па} \approx 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,013 \text{ бар}$. Під час розв'язування задач необхідно пам'ятати, що з наведених одиниць тиску лише Паскаль є одиницею СІ.

2.1.2. Рівняння стану ідеального газу

Ідеальним газом називається газ, в якому потенціальною енергією взаємодії між молекулами можна нехтувати, тобто її можна вважати рівною нулю. Молекули такого газу є матеріальними точками, які пружно співударяються як між собою, так і зі стінками посудини.

Будь-який реальний газ при достатньому розрідженні є близьким за своїми властивостями до ідеального. Виявляється, що деякі гази як повітря, кисень, азот навіть за нормальних умов мало відрізняються від ідеального газу. Особливо близькими за своїми властивостями до ідеального газу гелій і водень.

Клапейрон у 1984 р. дослідним шляхом встановив, що при невеликих густинах гази підкоряються рівнянню $PV/T = \text{const}$, якщо $m = \text{const}$ – *рівняння Клапейрона*.

Рівняння, яке встановлює зв'язок між макропараметрами P , V і T для одного моля ідеального газу, називається рівнянням *Клапейрона–Менделєєва*, або *рівнянням стану ідеального газу*:

$$PV_{\mu} = RT,$$

де V_{μ} – об'єм, який займає 1 моль ідеального газу, а R – *універсальна газова стала*. Величину універсальної газової сталої легко знайти, використовуючи значення P , V і T при нормальних умовах $T = 273$ К, $P = 1,01 \cdot 10^5$ Па і $V_{\mu} = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м³/моль,

$$R = PV_{\mu} / T = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Для будь-якої маси газу m , що займає об'єм $V = V_{\mu} \cdot m / \mu$, рівняння стану ідеального газу набуває вигляду:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

де μ – молярна маса.

З цієї формули можна визначити густину газу, який має певні тиск і температуру:

$$P = \frac{m}{\mu V} RT = \frac{\rho}{\mu} RT, \text{ тобто } \rho = \frac{P\mu}{RT}.$$

Рівняння стану можна записати через концентрацію молекул $n = N/V$ (кількість молекул в одиниці об'єму). Для цього помножимо і поділимо його праву частину на число Авогадро:

$$PV = \frac{m}{\mu} N_A \frac{RT}{N_A} \Rightarrow P = \frac{m}{\mu} N_A \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{RT}{N_A}$$

В отриманому виразі містяться такі величини: $N = (m/\mu)N_A$ – кількість молекул у даному об'ємі, $n = N/V$ – їх концентрація, $k = R/N_A$ – стала Больцмана

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Використовуючи ці значення, одержимо формулу для визначення тиску будь-якого газу:

$$P = nkT. \quad \text{Тобто: } n = \frac{P}{kT}.$$

Це означає, що всі ідеальні гази при однакових значеннях тиску і температури мають однакову кількість молекул в одиниці об'єму.

2.1.3. Температура

Температура – величина, яка характеризує стан термодинамічної рівноваги макросистеми, вона є макроскопічним параметром. Якщо при тепловому контакті одне тіло передає енергію іншому за рахунок теплопередачі, то вважають, що перше тіло має більшу температуру, ніж друге. Процес теплопередачі закінчується, коли температури обох тіл стають однаковими, тобто ТДС з двох тіл переходить у рівноважний стан.

Будь-який метод вимірювання температури вимагає встановлення температурної шкали. Розмір градуса температури виберемо діленням різниці $T_k - T_0 = 100$ на сто частин. $T_0 = 273,15$ градусів, а $T_k = 373,15$ градусів. Розглянута шкала температур газового термометра є абсолютною шкалою (шкала Кельвіна), а температура є температурою Кельвіна. Існує ще шкала Цельсія, де за нуль градусів прийнято температуру танення льоду. Температура у градусах Цельсія t пов'язана з температурою Кельвіна T співвідношенням $t = T - 273,15$.

При абсолютному нулі температури тиск і середня кінетична

енергія руху молекул дорівнюють нулю. Тобто, абсолютний нуль є температурою, при якій припиняється хаотичний (тепловий) рух молекул ідеального газу. Слід зазначити, що, нуль Кельвіна є недосяжний, сьогодні вдається отримувати низькі температури приблизно на рівні 0,001 К.

2.1.4. Число степенів вільності

Число степенів вільності (позначимо літерою i) жорсткої механічної системи (твердого тіла, жорсткої молекули) – це кількість незалежних величин, за допомогою яких може бути задано положення цієї системи у просторі.

Розглянемо одноатомний газ (рис. 2.1). Наприклад, гелій He, для якого число степенів вільності дорівнює трьом ($i = 3$), оскільки для визначення положення такої молекули у просторі достатньо трьох координат: X, Y, Z .

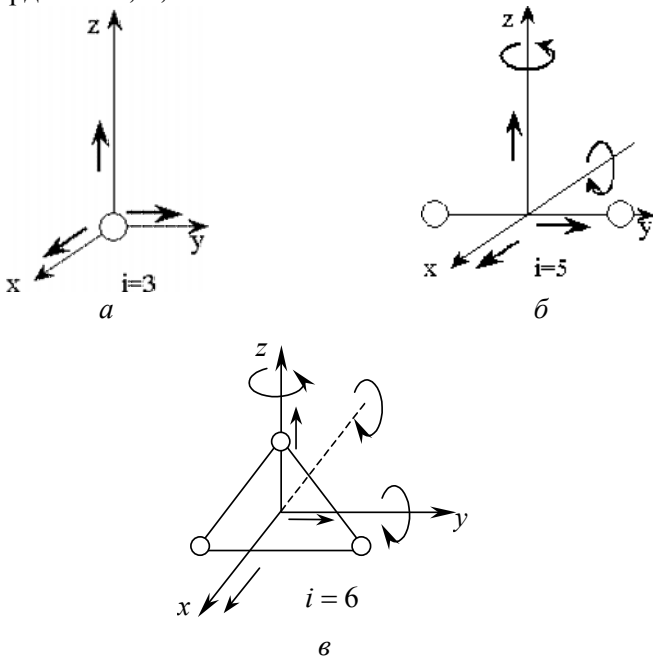


Рис. 2.1

Якщо молекула двоатомна (2 атоми жорстко пов'язані між

собою, вісь OX проходить через центр мас молекули), то для того, щоб задати її положення у просторі необхідні 3 координати x, y, z (визначають положення центра мас), а також 2 кути, які характеризують її обертання навколо осей OX і OZ (обертання навколо осі OY не змінює положення тіла у просторі).

Таким чином, двохатомна жорстка молекула має п'ять степенів вільності: три – визначають її поступальний рух, а два – обертальний (рис. 2.1,б).

Для багатоатомних жорстких молекул, які складаються з трьох і більше атомів, загальна кількість незалежних параметрів, що описують їх положення у просторі, дорівнює шести: три з них приходиться на поступальний рух центра мас і три на обертальний (рис. 2.1,в).

2.1.5. Закон рівномірного розподілу енергії за степенями вільності

Той факт, що середня кінетична енергія поступального руху одноатомної молекули ідеального газу становить $\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = 3/2 kT$ і ця молекула має тільки три поступальні степеня вільності (три напрямки руху абсолютно рівноцінні), означає, що на кожний поступальний степінь вільності в середньому припадає однакова кількість енергії: $1/2 \cdot kT$.

Л. Больцман узагальнив і теоретично довів цей висновок для всіх степенів вільності (не тільки для поступальних), тобто на кожний будь-який степінь вільності припадає кінетична енергія $1/2 \cdot kT$. Твердження, що на кожен степінь вільності припадає однакова кількість енергії, називають *законом рівномірного розподілу енергії* за степенями вільності. Він формулюється таким чином: *якщо система молекул перебуває в тепловому рівноважному стані при температурі T , то середня кінетична енергія рівномірно розподілена між всіма степенями вільності і для кожного степеня вільності молекули вона дорівнює $1/2 \cdot kT$.*

Наведемо конкретні вирази для середньої енергії молекули ідеального газу (молекули жорсткі, коливальні степені вільності відсутні). Одноатомний газ: $\langle \varepsilon \rangle = 3/2 \cdot kT$; двохатомний: $\langle \varepsilon \rangle = 5/2 \cdot kT$; трьохатомний і більше: $\langle \varepsilon \rangle = 6/2 \cdot kT = 3 \cdot kT$.

Молекули ідеального газу не взаємодіють між собою. Тому внутрішню енергію ідеального газу U масою m , яка містить N молекул з i -степенями вільності, можна визначити за формулою:

$$U = N \cdot \frac{i}{2} kT = \frac{m}{\mu} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT.$$

Енергія ідеального газу U є кінетичною енергією хаотичного руху молекул, а її величина залежить лише від температури і не залежить ні від тиску, ні від об'єму (для неідеальних газів це не так).

2.1.6. Розподіл Больцмана для частинок у зовнішньому потенціальному полі. Барометрична формула

З'ясуємо, зокрема, питання, як розподіляються молекули повітря в атмосфері Землі. Атмосферою називається повітряна оболонка Землі, маса якої ($5,3 \cdot 10^{18}$ кг) в основному зосереджена в повітряному шарі товщиною 8 км і яка складається на 78,09 % з азоту, 20,95 % кисню, 0,93 % аргону, 0,03 % вуглекислого газу. Ще 0,01 % припадає на долю Ne, He, Kr, O₃.

Виникає запитання: чому земна атмосфера не розсіюється по всьому всесвіту, чи навпаки, не лежить тонким шаром біля поверхні Землі? Такий нерівномірний розподіл молекул атмосфери за висотою пояснюється двома причинами:

- 1) молекули повітря знаходяться у потенціальному полі тяжіння Землі і це утримує їх біля поверхні;
- 2) внаслідок свого теплового хаотичного руху молекули прагнуть розбігтися по всьому простору. Отже, перша причина збирає молекули на поверхні, друга розкидає у просторі.

Досліди свідчать, що з висотою атмосферний тиск спадає, він зумовлений вагою верхніх шарів атмосфери, а точніше вагою повітряного стовпа, розташованого над рівнем, на якому вимірюється тиск. Якщо сила тиску (вага) стовпа повітря на площу S на висоті h над Землею, дорівнює F (рис. 2.2), то тиск

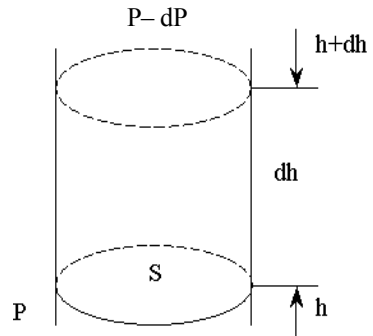


Рис. 2.2

становить $P = \frac{F}{S}$.

На висоті $h + dh$ тиск зменшиться і буде дорівнювати $P - dP$. Різниця тиску зумовлена зменшенням ваги стовпа повітря на величину: $dF = Sdh\rho g$, де $Sdh = V$ – об'єм, на який зменшився стовп повітря, над площею S , а ρ – густина повітря на висоті h , g – прискорення земного тяжіння, яке будемо вважати незалежним від висоти. Тоді визначимо:

$$(P - dP) - P = \frac{dF}{S} = \rho g dh \Rightarrow dP = -\rho g dh.$$

Знак "-" означає, що при збільшенні висоти тиск зменшується. З попереднього рівняння для dP можна записати:

$$dP = -\frac{\mu P g}{RT} dh \Rightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{\mu g}{RT} dh.$$

Для випадку $T = \text{const}$ (ізотермічна атмосфера) інтегрування цього рівняння дає співвідношення:

$$\ln P = -\frac{\mu g h}{RT} + \ln C,$$

де $\ln C$ – деяка константа, значення якої визначається з початкових умов. Потенціювання приводить до формули:

$$P = C e^{-\frac{\mu g h}{RT}}.$$

Для $h = 0$, $P = C = P_0$ – атмосферний тиск на поверхні Землі.

Тоді $P_h = P_0 e^{-\frac{\mu g h}{RT}}$,

де P_h – тиск на висоті h . Це *барометрична формула*.

Із неї видно, що атмосферний тиск зменшується з висотою за експоненціальним законом і тим швидше, чим менша T і більша μ . На рис. 2.3 показано дві криві, які можна трактувати як криві, що відповідають різним T (при однакових μ) або різним $\mu_1 > \mu_2$ (при однакових T).

Концентрація молекул атмосфери залежить від висоти

Барометрична формула дозволяє одержати співвідношення між концентраціями газу на різних висотах. Використовуючи рівняння стану ідеального газу, можна записати $P_0 = n_0 k T$ і

$P_h = n_h k T$, де P_0 і n_0 – тиск і концентрація молекул на висоті поверхні землі, а P_h і n_h – на висоті $h \neq 0$.

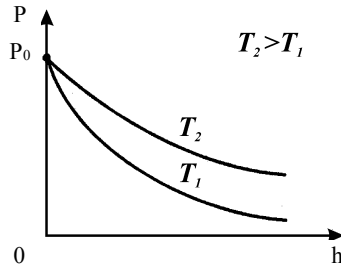


Рис. 2.3

Підставляючи значення P_h і P_0 у барометричну формулу, одержимо:

$$n_h = n_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}} = n_0 e^{-\frac{m_0 gh}{kT}}$$

(при цьому враховано, що $\frac{\mu}{R} = \frac{m_0}{k}$, де m_0 – маса молекули даного газу). Якщо врахувати, що $m_0 gh = W_p$ – потенціальна енергія молекули у полі тяжіння Землі, то формулу можна переписати так:

$$n = n_0 e^{-\frac{W_p}{kT}}.$$

Цією формулою визначається кількість молекул, які мають задану енергію W_p , де n_0 – кількість молекул з нульовою потенціальною енергією.

2.1.7. Внутрішня енергія термодинамічної системи

Для ідеального газу, коли не враховується взаємодія між молекулами, під внутрішньою енергією розуміють сумарну кінетичну енергію хаотичного руху молекул, вона становить

$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$, де i – число степенів вільності молекули. Підкреслимо,

що внутрішня енергія ідеального газу залежить лише від абсолютної температури.

$$dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT.$$

Таким чином, зміна внутрішньої енергії ідеального газу не залежить від шляху, яким система перейшла з одного стану в інший, і визначається виключно лише початковим і кінцевим станами системи. Тому кажуть, що *внутрішня енергія є функцією стану системи*, а її зміна пов'язана лише зі зміною температури.

Для внутрішньої енергії характерна властивість адитивності, тобто внутрішня енергія складної системи дорівнює сумі внутрішніх енергій її підсистем:

$$U = \sum_{i=1}^N U_i .$$

2.1.8. Робота

При виконанні ТДС роботи відбувається переміщення зовнішніх тіл, наприклад, газ, що розширюється в циліндрі, переміщує поршень. Це свідчить про те, що частина енергії хаотичного теплового руху молекул переходить в енергію спрямованого механічного руху. Якщо ж газ під дією зовнішніх сил стискається, то молекули газу біля поршня набувають спрямованого руху, який швидко переходить у тепловий. Температура газу, а відповідно і його внутрішня енергія при цьому зростають. Кількісною мірою цих змін є робота.

Знайдемо вираз для роботи при розширенні газу. Уявимо собі газ у циліндрі під поршнем з площею поперечного перерізу S (Рис. 2.4). Нехай газ під час рівноважного розширення переміщує поршень на елементарно малу відстань dx , у межах якої можна вважати, що $P = \text{const}$. Тоді газ виконає елементарну роботу δA : $\delta A = Fdx = PSdx = PdV$, де F – сила тиску газу на поршень; dV – збільшення об'єму газу.

Повну роботу, яку виконає газ у будь-якому термодинамічному процесі при зміні його об'єму від V_1 до V_2 ,

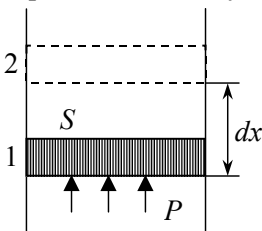


Рис. 2.4

отримаємо при інтегруванні рівності $\delta A = PdV$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV$$

Надалі будемо вважати роботу, що виконає термодинамічна система, додатною ($\delta A > 0$), а роботу, яка виконується над

термодинамічною системою, від'ємною ($\delta A < 0$).

2.1.9. Теплоота

Надання системі теплоти безпосередньо пов'язано зі зміною хаотичного теплового руху частинок, що входять до складу термодинамічної системи. При цьому зміну внутрішньої енергії визначають кількістю теплоти Q , яку одержує або віддає система при теплообміні. Кількість теплоти Q – це не що інше як енергія. Надання (чи відбирання) системі тепла Q не пов'язано з переміщенням зовнішніх тіл. Такий процес відбувається при безпосередньому контакті двох зовнішніх тіл (“посередником” між двома тілами може бути третє тіло) або шляхом випромінювання.

Кількість теплоти в системі СІ вимірюють в одиницях енергії, тобто в джоулях.

Експериментально встановлено, що кількість теплоти Q , яка необхідна для нагрівання даної маси речовини m від температури T_1 до T_2 , пропорційна масі речовини і зміні температури ΔT :

$$Q = cm\Delta T \quad \text{або} \quad \delta Q = cm dT,$$

де δQ – елементарна кількість теплоти, що одержує ($\delta Q > 0$) або віддає ($\delta Q < 0$) система; коефіцієнт c – питома теплоємність речовини, dT – мала (елементарна) зміна температури.

Питома теплоємність чисельно дорівнює кількості теплоти, яка необхідна для нагрівання одиниці маси речовини на один кельвін:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}; \quad [c] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right].$$

Кількість теплоти, необхідної для нагрівання одного моля речовини на один градус, називається *молярною теплоємністю*. На відміну від питомої теплоємності c , молярна теплоємність $C = \delta Q / dT$ є характеристикою твердого тіла, рідини, газу в цілому, тобто системи масою в 1 моль. Між питомою теплоємністю c і молярною C існує очевидне співвідношення:

$$C = c\mu = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT}; \quad [C] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right].$$

Теплоємність залежить від умов, при яких тілу надається (відбирається) теплота і змінюється його температура.

2.1.10. Перший принцип термодинаміки

Експериментально встановлено, що система (наприклад, газ в циліндрі під поршнем), яка має внутрішню енергію U_1 , після отримання певної кількості теплоти Q і здійснення роботи проти зовнішніх тіл (див. рис. 2.4, де поршень перемістився вгору), переходить у новий стан, що характеризується внутрішньою енергією U_2 . Результатом проведеного процесу є зміна внутрішньої енергії системи ΔU , що дорівнює різниці між кількістю теплоти Q , яку одержала система, і роботою $-A$, яку виконала система, тобто

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - A \Rightarrow Q = \Delta U + A.$$

Це рівняння в диференціальній формі має вигляд

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

Ці формули є виразом *першого принципу термодинаміки*: кількість теплоти, що одержує система, йде на приріст $\Delta U = U_2 - U_1$ її внутрішньої енергії і на виконання системою роботи A над зовнішніми тілами (приріст ΔU внутрішньої енергії може мати будь-який знак або дорівнювати нулю).

Знак повного диференціала функції U (dU) вказує на те, що внутрішня енергія є функцією стану системи. Робота й теплота, які потрібні для переведення системи з одного стану в інший, є функціями процесу, а не функціями стану.

Математично це означає, що знаки δQ і δA не є повними диференціалами. Іншими словами, у кожному стані система має певне значення внутрішньої енергії U , але про неї (про систему) не можна казати, що вона має певне значення кількості теплоти або роботи. Перший принцип термодинаміки є законом збереження енергії для теплових процесів.

2.1.11. Застосування першого принципу термодинаміки до ізопроесів в ідеальних газах

Ізопроесами називаються процеси, під час протікання яких один із параметрів, що описує стан газу, залишається незмінним.

Ізохорний процес ($V = \text{const}$)

За умови $V = \text{const}$ (рис. 2.5) рівняння стану ідеального газу для одного моля має вигляд: $P/T = \text{const}$ (закон Шарля). З урахуванням виразу для роботи $\delta A = PdV$ запишемо перший принцип термодинаміки у такому вигляді

$$\delta Q = dU + PdV.$$

Тоді для ізохорного процесу ($V = \text{const}$, $dV = 0$) рівняння набуває вигляду $\delta Q = dU$. Це означає, що вся теплота, яка підведена до ТДС, спрямована лише на зміну її внутрішньої енергії.

Замінімо значення dU і δQ та отримаємо вираз першого принципу термодинаміки для ізохорного процесу в іншому вигляді:

$$\frac{m}{\mu} C_V dT = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT,$$

де C_V – молярна теплоємність ідеального газу при сталому об'ємі:

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

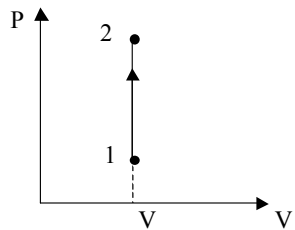


Рис. 2.5

Ізобарний процес ($P = \text{const}$)

Процес відбувається при постійному тиску $P = \text{const}$ (рис. 2.6). За цієї умови рівняння стану ідеального газу для одного моля набуває вигляд $V/T = \text{const}$ (закон Гей-Люссака).

При ізобаричному процесі при наданні теплоти ззовні, системою буде виконуватись робота і змінюватись її внутрішня енергія. Тому перший принцип термодинаміки залишиться незмінним і його можна записати так

$$\frac{m}{\mu} C_p dT = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT + PdV \Rightarrow C_p = \frac{i}{2} R + \frac{(PdV)}{\frac{m}{\mu} dT},$$

де C_p – молярна теплоємність ідеального газу при сталому тиску, яка для C_V дорівнює

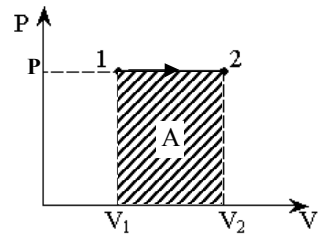


Рис. 2.6

$$C_p = C_v + \frac{(PdV)}{\frac{m}{\mu} dT}.$$

Диференціюючи рівняння Менделєєва–Клапейрона при сталому тиску, одержимо $PdV = (m/\mu)RdT$. Звідси виходить $R = (PdV)/[(m/\mu)dT]$, що *універсальна газова стала* чисельно дорівнює роботі ($\delta A = PdV$), яку виконує 1 моль ідеального газу ($m/\mu = 1$) під час ізобарного розширення при його нагріванні ($dT = 1$) на 1 кельвін. Отже

$$C_p = C_v + R.$$

Це рівняння має назву *формула Майєра*, проаналізувавши її, робимо висновок, що C_p більше за C_v на величину роботи, що виконується при ізобарному процесі;

Ізотермічний процес ($T = \text{const}$)

Для ізотермічного процесу рівняння стану ідеального газу для одного моля набуває вигляду $PV = \text{const}$ (закон Бойля-Маріотта). Оскільки для такого процесу $dT = 0$, то внутрішня енергія газу залишається незмінною ($dU = 0$). Тоді

$$\delta Q = PdV = \delta A.$$

Отже, вся надана термодинамічній системі теплота витрачається на виконання системою роботи над зовнішніми тілами (ізотермічне розширення газу). А при ізотермічному стисканні ідеального газу робота зовнішніх сил витрачається на збільшення внутрішньої енергії (нагрівання) оточуючих тіл.

При ізотермічному розширенні газу його теплоємність $C = \delta Q / [(m/\mu)dT]$ дорівнює нескінченності: $dT = 0 \Rightarrow C_T = \pm \infty$.

Визначимо роботу газу при ізотермічному процесі

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Враховуючи, що $PV = (m/\mu) \cdot RT$ і $P_1V_1 = P_2V_2$, одержимо ще один вираз для роботи при ізотермічному процесі:

$$A = P_1V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = P_2V_2 \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Адіабатичний процес ($\delta Q = 0$)

Адіабатичний процес – це процес, який відбувається без

теплообміну з навколишнім середовищем. При такому процесі теплоємність газу дорівнює нулю $C_Q = \delta Q / dT = 0$. Для адіабатичного процесу закон збереження енергії набуває вигляду:

$$dU + \delta A = 0 \Rightarrow \delta A = -dU \Rightarrow PdV = -dU.$$

Це означає, що робота, яка пов'язана зі зміною об'єму газу, повинна супроводжуватися зміною внутрішньої енергії, отже, і температури. Знак мінус означає, що розширення газу супроводжується зниженням його температури, а стискання – її підвищенням.

У першому випадку робота виконується газом за рахунок його власної енергії, тому температура газу знижується. У другому випадку робота виконується зовнішньою силою і за рахунок цієї роботи зростає внутрішня енергія газу, відповідно зростає і його температура.

Рівняння Пуассона:

$$PV^{C_P/C_V} = \text{const} \Rightarrow PV^\gamma = \text{const}$$

Відношення C_P/C_V позначається γ і називається *адіабатичною сталою*, яку можна записати у вигляді

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i},$$

де i – число степенів вільності.

Величина адіабатичної сталої для ідеального газу може набувати таких значень: $\gamma = 1,67$ ($i = 3$, одноатомний газ); $\gamma = 1,40$ ($i = 5$, двоатомний газ); $\gamma = 1,33$ ($i = 6$, трьохатомний газ).

2.1.12. Теплові машини

Колові процеси (цикли)

Коловим процесом або циклом називають процес, у результаті якого система, зазнавши низку змін, повертається в початковий стан. Важливість циклічних процесів, у першу чергу, пояснюється тим, що у повсякденному житті будь-які двигуни працюють саме за цими процесами.

Наведемо формулювання Вільяма Томсона (лорд Кельвін): *неможливі такі процеси, єдиним результатом яких є віднімання від деякого тіла певної кількості тепла і перетворення цього тепла*

повністю в роботу. Відповідно до цього принципу теплота, що взята у джерела, може бути перетворена в механічну роботу в циклічному процесі за умови, що має змінитися стан іншого тіла. Отже, у процесі перетворення теплоти у механічну роботу крім джерела теплоти (нагрівник), від якого теплота забирається, і робочого тіла (газ), якому ця теплота передається, повинно бути ще третє тіло (холодильник), якому передається частина тепла Q_2 від робочого тіла, щоб останнє мало змогу повернутись у початковий стан. Твердження, що для здійснення роботи в циклічній машині необхідною умовою є існування двох тіл з різною температурою (нагрівник і холодильник) називається принципом Карно.

Коефіцієнт корисної дії теплових машин

Чим більше перетворює тепла машина отримане ззовні тепло Q_1 у корисну роботу A , тим ефективнішою є така машина. Тому теплову машину характеризують коефіцієнтом корисної дії (ККД) η , який визначається як відношення роботи, що була виконана робочим тілом протягом повного циклу, до кількості теплоти, що надається робочому тілу:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}, \quad \text{або} \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

ККД не може бути більше одиниці.

2.1.13. Цикл Карно

Розглянемо коловий процес, при якому робота, яка виконується тепловою машиною за рахунок наданого їй тепла, буде максимально можливою. Ми вже знаємо, що будь-яка циклічна теплова машина складається з трьох головних частин (рис. 2.7):

1) нагрівника, який має температуру T_1 ; 2) робочого тіла (газ), яке, контактуючи з нагрівником, одержує від нього певну кількість тепла Q_1 ; 3) холодильника, який має температуру $T_2 < T_1$, і якому робоче тіло при контакті віддає певну кількість тепла Q_2 .

Будемо вважати, що нагрівник і холодильник мають настільки велику теплоємність (наприклад, дуже масивні), що їх температури практично не змінюються від того, що від першого забирається, а другому передається певна кількість теплоти.

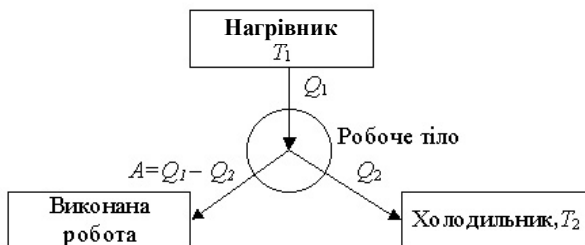


Рис. 2.7

У коловому процесі виділимо певну ділянку і розглянемо, за яких умов на цій ділянці буде виконуватись максимальна робота. Згідно з першим принципом термодинаміки, робота, що виконується за рахунок наданої теплоти, дорівнює $\delta A = \delta Q - dU$. Найбільша робота виконується при ізотермічному процесі $\delta A = \delta Q$, коли внутрішня енергія не змінюється $dU = 0$.

Французький вчений Саді Карно встановив, що оборотний цикл, який складається з двох ізотерм і двох адіабат, має максимальне значення ККД, тобто є найбільш раціональним циклом.

Розглянемо детальніше цикл Карно (рис. 2.8), де робочим тілом є один моль ($m/\mu = 1$) ідеального газу, що перебуває під рухомим поршнем.

Процес 1→2. Почнемо циклічний процес з того, що газ, який має параметри P_1 , V_1 і T_1 , перебуває в тепловому контакті з масивним нагрівником, який має температуру T_1 . Далі, не порушуючи контакту з нагрівником, надамо

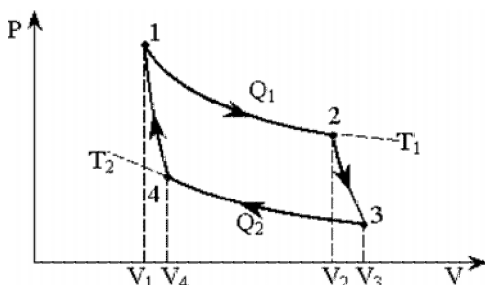


Рис. 2.8

можливість газу, розширюючись, пересувати поршень. Газ ізотермічно розшириться до стану 2 з параметрами $P_2; V_2; T_1$, і при цьому він виконає корисну роботу A_{12} проти сил зовнішнього тиску за рахунок теплоти Q_1 , отриманої від нагрівника, для одного моля газу запишемо

$$Q_1 = A_{12} = RT_1 \ln V_2 / V_1.$$

Процес 2→3. При циклічному процесі необхідно частину отриманого тепла Q_1 передати холодильнику. Газ необхідно спочатку охолодити до температури холодильника і вже після цього їх можна привести в контакт. Для цього робоче тіло від'єднується від нагрівника і йому надається можливість адіабатично розширитись до стану 3 (див. рис. 2.8) з параметрами P_3, V_3, T_2 . У процесі такого розширення газ за рахунок своєї внутрішньої енергії виконує додаткову корисну роботу A_{23} . При цьому втрата частини власної внутрішньої енергії призведе до зниження температури газу до температури холодильника $T_2 < T_1$. Отже, маємо $\delta A = -dU$

$$A_{23} = - \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = C_V (T_1 - T_2).$$

На цьому закінчується перша половина циклу, під час якої газ виконав корисну роботу за рахунок тепла від нагрівника.

Після цього робоче тіло необхідно повернути у початковий стан. Ця процедура теж виконується в два етапи.

Процес 3→4. Спочатку робоче тіло, що має температуру холодильника T_2 , з'єднується з ним, а потім, не порушуючи контакту з холодильником, воно зовнішніми силами стискається до стану 4 (див. рис. 2.8) з параметрами P_4, V_4, T_2 . У процесі такого ізотермічного стискання робоче тіло віддає певну кількість теплоти Q_2 холодильнику (інакше підвищувалась би температура і процес не був би ізотермічним), а зовнішні сили при цьому виконують над газом роботу, яка від'ємна

$$Q_2 = A_{34} = -RT_2 \ln V_3 / V_4.$$

Процес 4→1. Газ відокремлюється від холодильника, його додатково адіабатично стискають зовнішніми силами, так, щоб він нагрівся до температури нагрівника (крива 41) і потрапив у стан 1 (див. рис. 2.8). При цьому зовнішні сили виконують від'ємну роботу A_{41} :

$$A_{41} = - \int_{T_2}^{T_1} C_V dT = -C_V (T_1 - T_2).$$

Після адіабатичного стискання, коли температура газу дорівнюватиме температурі нагрівника T_1 , їх приводять у контакт. На цьому цикл завершений і може бути багаторазово повторений.

ККД реальної (необоротної) теплової машини, що працює за циклом Карно, завжди менший ККД оборотної (ідеальної) теплової машини, яка працює за тим самим циклом і з тим самим нагрівником і холодильником. Це перша теорема Карно. Наголосимо, що йдеться про порівняння ККД оборотних і необоротних машин, що працюють за одним і тим же циклом Карно, а не про машини, які працюють за різними циклами.

$$\eta_{\text{реал}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Більш того, у термодинаміці доведено, що ККД оборотного циклу Карно більший за ККД будь-якого іншого оборотного циклу, в якому максимальні і мінімальні температури дорівнюють відповідно температурам нагрівника і холодильника циклу Карно.

2.1.14. Другий принцип термодинаміки

Перший принцип термодинаміки – це закон збереження теплової енергії. Він нічого нам не говорить про напрями теплообміну і перетворення теплоти. Головне, щоб виконувався тепловий баланс – кількість теплоти, що віддало одне тіло, повинно дорівнювати кількості теплоти, що отримало інше тіло.

Другий принцип термодинаміки у формулюванні Вільяма Томсона (лорд Кельвін): *Неможливі такі процеси, єдиним результатом яких є віднімання від деякого тіла певної кількості тепла і перетворення цього тепла повністю в роботу.*

Інший приклад. Перший принцип термодинаміки допускає *самочинний* перехід теплоти від менш нагрітого до більш нагрітого тіла. Але ніхто і ніколи такого *самочинного* переходу не спостерігав. Такі властивості процесів (напрямок переходу) пояснює тільки другий принцип термодинаміки. Незалежно від Томсона Клаузіус сформулював другий принцип термодинаміки так: *Теплота не може переходити сама по собі від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, або неможливі процеси, єдиним кінцевим результатом яких був би перехід тепла від холодного до гарячого тіла.*

Підкреслимо, що слово *єдиний* в обох формулюваннях є важливим, без нього вони втрачають зміст. Якби не другий принцип термодинаміки, можна було легко вирішити енергетичну проблему. Побудувати двигун без холодильника, який забирав би тепло від

безмежного джерела енергії, наприклад, океану, що завжди підігрівається сонцем, і повністю перетворював це тепло в механічну роботу. Практично такий двигун рівноцінний вічному двигуну. Тому другий принцип термодинаміки іноді формулюється так: *Неможливий перпетуум мобіле другого роду, тобто такий періодично діючий двигун, який отримував би тепло від одного резервуара і перетворював це тепло повністю в роботу.*

Всі формулювання другого принципу термодинаміки еквівалентні і всі вони базуються на узагальнених дослідних фактах.

2.1.15. Задачі

Приклади розв'язання задач

Задача 1. Визначити тиск 4 кг кисню, що знаходиться в балоні місткістю 2 м³ при температурі 29 °С.

Розв'язання. Для наближеного розв'язання цієї задачі скористаємося рівнянням Менделєєва-Клапейрона.

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \text{ звідки } P = \frac{mRT}{\mu V}.$$

Молярну масу кисню (O₂) знайдемо за допомогою таблиці Менделєєва (див. НЕ-9 – таблиці довідок) $\mu = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Температуру виразимо в градусах Кельвіна: $T = 273 + 29 = 302$ К.

Перевіримо одиницю виміру:

$$[P] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{кг/моль} \cdot \text{К} \cdot \text{моль} \cdot \text{м}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

Обчислення: $P = (4 \cdot 8,31 \cdot 302) / (32 \cdot 10^{-3} \cdot 2) = 157000$ Па.

Відповідь: $P = 1,57 \cdot 10^5$ Па.

Задача 2. Обчислити середню кінетичну енергію молекули газу при температурі 27 °С.

Розв'язання. Середня кінетична енергія молекули газу

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2},$$

де m_0 – маса молекули газу, $\langle v^2 \rangle$ – квадрат середньої квадратичної швидкості молекул газу.

$$\langle v^2 \rangle = \frac{3RT}{\mu}, \text{ тому } \langle \varepsilon \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3m_0 RT}{2\mu}.$$

Вираз μ/m_0 є числом Авогадро N_A , тому остаточний вираз для розрахунку кінетичної енергії молекули газу:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3RT}{2N_A}.$$

Перевіримо одиницю виміру: $[\langle \varepsilon \rangle] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{моль} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}^{-1}} = \text{Дж}.$

Обчислення: $\langle \varepsilon \rangle = \frac{3 \cdot 8,31 \cdot 300}{2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 6,21 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$

Відповідь: $\langle \varepsilon \rangle = 6,21 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$

Задача 3. Обчислити внутрішню енергію одного моля водню, взятого при температурі $t = -23^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Внутрішня енергія одного моля ідеального газу

$$U = \frac{i}{2} RT,$$

де i – число степенів вільності; R – універсальна газова стала; T – температура. Для двохатомної молекули водню (H_2) $i = 5$.

Обчислення: $U = \frac{5}{2} \cdot 8,3 \cdot 250 = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$

Відповідь: $U = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$

Задача 4. Скільки тепла потрібно для нагрівання 10 г водню від 300 до 350 °C при сталому тиску?

Розв'язання. Кількість теплоти, що потрібна для нагрівання маси m газу від температури T_1 до T_2 при сталому тиску, визначається за формулою $Q = c_p m (T_2 - T_1).$

Питома теплоємність менша від молярної в μ разів, тобто

$$c_p = \frac{C_p}{\mu} = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{R}{\mu}.$$

Шукана кількість теплоти

$$Q = \frac{i+2}{2} \frac{R}{\mu} m (T_2 - T_1).$$

Для двохатомної молекули $i = 5$.

Обчислення: $Q = \frac{5+2}{2} \frac{8,31}{2 \cdot 10^{-3}} 0,01 \cdot 50 = 7280 \text{ Дж}.$

Відповідь: $Q = 7280$ Дж .

Задача 5. Визначити питомі теплоємності неону при сталому об'ємі c_V і сталому тиску c_P . Вважати цей газ ідеальним.

Розв'язання. Питомі теплоємності ідеальних газів визначаються за формулами (див. попередню задачу)

$$c_V = \frac{i R}{2 \mu}, \quad c_P = \frac{i + 2 R}{2 \mu}.$$

Для неону (одноатомний газ) $i = 3$, $\mu = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Підставляючи в останні формули значення величин, взятих в одиницях системи СІ, виконаємо обчислення:

$$c_V = \frac{3}{2} \cdot \frac{8,3}{20 \cdot 10^{-3}} = 624 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$
$$c_P = \frac{3 + 2}{2} \cdot \frac{8,3}{20 \cdot 10^{-3}} = 1,04 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Відповідь: $c_V = 624 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $c_P = 1,04 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Задача 6. Яка зовнішня робота буде виконана, якщо 200 г азоту нагріти від 20 до 100 °С при сталому тиску?

Розв'язання. При ізобарному нагріванні газу теплота Q , передана газу, йде на збільшення його внутрішньої енергії ΔU та на виконання роботи A проти зовнішніх сил. На основі першого закону термодинаміки $Q = \Delta U + A$ маємо $A = Q - \Delta U$.

Теплота, передану газу $Q = \frac{m}{\mu} C_P \Delta T$,

а зміна внутрішньої енергії $\Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T$,

тоді робота, виконана проти зовнішніх сил, дорівнює

$$A = \frac{m}{\mu} C_P \Delta T - \frac{m}{\mu} C_V \Delta T = \frac{m}{\mu} \Delta T \left(\frac{i + 2}{2} - \frac{i}{2} \right) R = \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

де $\mu = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярна маса азоту.

Перевіримо одиницю виміру $[A] = \frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{кг/моль}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = \text{Дж}$.

Обчислення: $A = \frac{0,2}{28 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 80 = 4754$ Дж .

Відповідь: $A = 4754$ Дж.

Аудиторні задачі

1. Балон об'ємом 12 л містить азот при тиску 8,1 МПа і температурі 17 °С. Яка маса азоту знаходиться у балоні? (1,13 кг).
2. Знайти тиск 40 л кисню при температурі 107 °С, якщо за нормальних умов цей кисень займає об'єм 13 л. ($4,52 \cdot 10^4$ Па).
3. У балоні знаходиться 10 кг газу при тиску 10 МПа. Яку масу газу було випущено з балону, якщо тиск став рівним 2,5 МПа? Температуру газу вважати сталою. (7,5 кг).
4. Знайти масу сірчаного газу (SO_2), який займає об'єм 25 л при температурі 27 °С і тиску 100 кПа. (65 г).
5. Знайти масу повітря, яке заповнює аудиторію висотою 5 м і площею підлоги 200 м². Тиск повітря 100 кПа, температура 17 °С. Молярна маса повітря 0,029 кг/моль. (1,2 т).
6. Масу 5 г азоту, яка знаходиться в закритому балоні об'ємом 4 л при температурі 20 °С, нагріли до температури 40 °С. Знайти на скільки зміниться тиск газу після нагрівання. (8 кПа).
7. При температурі 50 °С тиск насиченого водяного пару 12,3 кПа. Знайти густину водяного пару. (0,083 кг/м³).
8. Знайти густину водню при $t = 15$ °С і $P = 97,3$ кПа. (0,081 кг/м³).
9. На якій висоті тиск повітря складає 75% від тиску над рівнем моря? Температура повітря 0 °С. (2,3 км).
10. Питома теплоємність двохатомного газу 14,55 кДж/кг · К. Визначити молярну масу цього газу. (0,002 кг/моль).
11. Густина двохатомного газу при нормальних умовах 1,42 кг/м³. Визначити питомі теплоємності c_p і c_v . (650 Дж/кг·К; 910 Дж/кг·К).
12. Визначити молярну й питому теплоємності гелію при сталому об'ємі. (12,5 Дж/моль · К; 3125 Дж/кг · К).
13. Для нагрівання гелію при сталому тиску було витрачено 5 кДж тепла. Визначити зміну внутрішньої енергії та роботу, виконану газом? (3 кДж; 2 кДж).
14. Водень масою 4 г нагріли на 10 К при сталому тиску. Визначити роботу розширення газу. (166 Дж).
15. Газ займає об'єм 10 л під тиском 0,2 МПа, його ізотермічно розширили до об'єму 28 л. Визначити роботу газу. (2 кДж).
16. Ідеальна теплова машина, яка працює по циклу Карно, здійснює за один цикл роботу 2,94 кДж і віддає за один цикл холодильнику 13,4 кДж теплоти. Знайти ККД циклу. (18%).

2.2. НАВЧАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ ЕЛЕКТРИКА

2.2.1. Електричні заряди та їх взаємодія

Здатність багатьох тіл електризуватися відома людству дуже давно. Відомо також, що існує два види електричних зарядів, умовно названих позитивними і негативними. Заряди одного знака відштовхуються, протилежного — притягуються.

Електричний заряд — важлива властивість багатьох елементарних частинок. Усі елементарні частинки можуть мати електричний заряд, який має одне з трьох значень:

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

$$q = 0;$$

$$q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Заряд e дістав назву *елементарного*. Наприклад, елементарна частинка електрон має негативний елементарний заряд, протон — позитивний, нейтрон — нульовий.

Будь-який заряд макроскопічного тіла є сумою елементарних зарядів, тому кажуть, що електричний заряд квантований, тобто може змінюватись тільки порціями, кратними елементарному заряду. Але оскільки елементарний заряд дуже маленький, досить часто вважають, що заряд тіла змінюється неперервно.

У природі має місце *закон збереження електричного заряду*: в електрично ізольованій системі алгебраїчна сума електричних зарядів залишається незмінною. Електрично ізольованою називають систему, через межі якої не можуть проходити заряджені частинки.

Для зручності опису електричних явищ використовують ідеалізоване поняття точкового заряду. *Точковим зарядом* називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями до інших заряджених тіл.

Взаємодія точкових електричних зарядів визначається законом Кулона, який було встановлено експериментально в 1785 році. *Два нерухомі точкові електричні заряди у вакуумі притягуються або відштовхуються із силою, пропорційною до абсолютної величини кожного заряду і обернено пропорційною до квадрата відстані між ними.* Для обох зарядів модуль сили взаємодії можна подати у вигляді

$$F = |\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r_{12}^2}.$$

де q_1, q_2 — величини зарядів, що взаємодіють; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — електрична стала в системі СІ; Сила \vec{F}_{12} — це сила, що діє з боку першого заряду на другий, а \vec{F}_{21} — сила, що діє з боку другого заряду на перший.

Під час взаємодії електрично заряджених тіл виконується *принцип суперпозиції*: сила взаємодії двох зарядів не залежить від наявності інших зарядів. Якщо наявні інші заряди (рис. 2.9), результуюча сила, що діє на заряд q_0 , дорівнює векторній сумі сил, з якими кожний заряд діє окремо на q_0 :

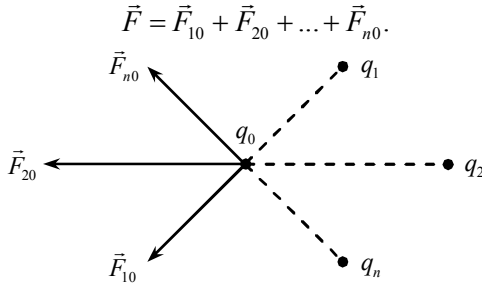


Рис. 2.9

2.2.2. Електричне поле у вакуумі та його характеристики

Напруженість. Силкові лінії поля

Електричне поле — це властивість простору, що виникає разом з появою заряду і виявляється як дія із силою \vec{F} на інший електричний заряд, внесений у будь-яку точку даного простору. Кількісною (силовою) характеристикою цієї дії є напруженість електричного поля \vec{E} .

Напруженість електричного поля в даній його точці дорівнює відношенню сили \vec{F} , що діє з боку поля на пробний заряд q_0 , внесений у цю точку поля, до абсолютної величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

(пробним q_0 називають позитивний точковий заряд, що не спотворює поле, яке досліджується).

У системі СІ напруженість електричного поля вимірюється у вольтах на метр. Вочевидь, що $1 \frac{\hat{A}}{i} = 1 \frac{\hat{A} \cdot \hat{a}}{\hat{A} \cdot i} = 1 \frac{\hat{I} \cdot i}{\hat{A} \cdot i \cdot \hat{n}} = 1 \frac{\hat{I}}{\hat{E} \hat{e}}$, тобто за напруженості поля в $1 \frac{\hat{A}}{i}$ на заряд в 1 Кл діє сила в 1 Н.

Якщо поле створюється точковим зарядом q , то

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} \vec{e},$$

а напруженість поля

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \vec{e}.$$

Ця формула визначає напруженість електричного поля, що створюється точковим зарядом q , у точці, віддаленій на відстань r від нього. З неї випливає, що напруженість поля в даній точці не залежить від наявності в ній пробного заряду. Напрямок вектора \vec{E} збігається з напрямком сили, що діє на позитивний пробний заряд з боку позитивного або негативного заряду (рис. 2.10).

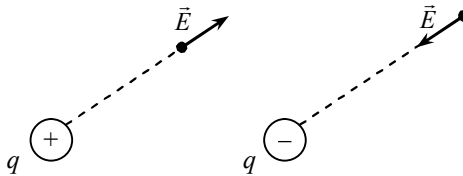


Рис. 2.10

Для електричних полів виконується принцип суперпозиції: напруженість поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, які створював би кожний заряд окремо:

$$\vec{E} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{q_0} = \frac{\sum_{i=1}^n q_0 \vec{E}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

Для графічного зображення електричного поля використовують лінії напруженості, або силові лінії. *Лініями напруженості (силовими лініями)* електричного поля називають криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора \vec{E} (рис. 2.11).

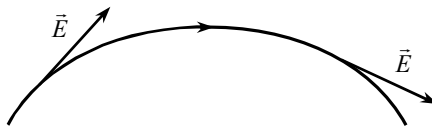


Рис. 2.11

Лінії напруженості починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних зарядах. У разі ізольованих точкових зарядів лінії напруженості являють собою сукупність радіальних прямих, напрямлених від заряду, якщо він позитивний, і до заряду,

якщо він негативний (рис. 2.12). Ось чому вважають, що позитивні заряди є джерелом вектора \vec{E} , а негативні — стоком. Силкові лінії не перетинаються, оскільки в кожній точці поля вектор \vec{E} має єдине значення.

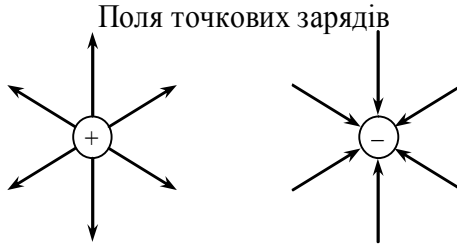


Рис. 2.12

Густота ліній вибирається таким чином, щоб кількість ліній, які проходять через одиничну площину, зорієнтовану перпендикулярно до цих ліній, була кратною модулю вектора \vec{E} . Надалі для спрощення вважатимемо, що густота ліній просто дорівнює модулю вектора \vec{E} . Тоді за картиною ліній напруженості можна судити про напрям і величину вектора \vec{E} в різних точках простору. На рис. 2.13 зображено силкові лінії для однорідного і неоднорідного полів. Для останнього напруженість спадає зліва направо.

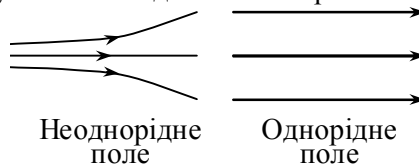


Рис. 2.13

Модуль напруженості електричного поля

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2}.$$

2.2.3. Робота в електричному полі

Оскільки в електростатичному полі на заряди діють сили, то під час переміщення зарядів ці сили поля виконують роботу.

Робота dA з переміщення заряду q_0 від A до C дорівнює:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = Fdl \cos \alpha = Fdx,$$

де F — кулонівська сила, що діє між зарядами; $dx = dl \cos \alpha$ — проекція dl на лінію переміщення; α — кут між напрямом дії сили і напрямом переміщення. $F = q q_0 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$, тобто

$$dA = \frac{qq_0 dr}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Повна робота з переміщення заряду q_0 із точки 1 у точку 2 така:

$$A = \int_1^2 dA = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq_0 dr}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Отже, за довільного вибору початкової і кінцевої точок робота не залежить від форми шляху, а визначається тільки положенням цих точок відносно заряду q , який утворює електричне поле. Вочевидь, що під час переміщення заряду q_0 замкненим контуром l ($r_1 = r_2$) робота дорівнює нулю:

$$A = \oint_l dA = 0.$$

Силкові поля, що задовольняють цю умову, називають *потенціальними*

2.2.4. Потенціал поля і його зв'язок із напруженістю

Розглянута в попередньому підрозділі робота з переміщення пробного заряду q_0 від точки 1 до точки 2 в електростатичному полі точкового заряду q виконується за рахунок сил поля і може бути подана як зменшення (або приріст зі знаком «мінус») потенціальної енергії взаємодії між цими зарядами

$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} = -(W_{p2} - W_{p1})$$

(нагадаємо, що зміну будь-якої величини a можна характеризувати або її приростом або зменшенням, приріст і зменшення — алгебраїчні величини, що мають різні знаки).

Вираз для потенціальної енергії пробного заряду q_0 , що міститься в полі точкового заряду q :

$$W_p = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r} + \text{const}.$$

Потенціальна енергія визначена з точністю до сталої величини (const). Значення цієї сталої можна дістати за умови, що за нескінченної відстані від заряду q до заряду q_0 потенціальна енергія їх взаємодії дорівнює нулю. Отже, const = 0. Остаточо дістаємо:

$$W_p = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Потенціалом точки поля називають відношення потенціальної енергії пробного заряду в цій точці до абсолютної величини самого пробного заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}.$$

Тоді потенціал поля точкового заряду можна подати у вигляді

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Вочевидь, що на нескінченності потенціал точкового заряду дорівнює нулю.

Новий вираз для роботи під час переміщення пробного заряду q_0 з точки 1 в точку 2, які мають відповідно потенціали φ_1 і φ_2 , можна дістати на основі попередніх формул:

$$A = W_{p1} - W_{p2} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Порівнявши цей вираз для роботи з виразом $dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = \vec{E}q_0 \cdot d\vec{l}$, дістаємо вираз для різниці потенціалів:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}) = \int_1^2 E_r dl \quad \text{або} \quad E = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{dl}$$

Якщо заряд віддаляється від точки 1 у нескінченність (тобто $\varphi_2 = 0$), то робота сил поля

$$A_\infty = q_0\varphi_1.$$

Одиницею виміру потенціалу в системі СІ є вольт $\left(\hat{A} = \frac{\hat{\Delta}x}{\hat{E} \hat{e}} \right)$.

Вольт — це такий потенціал точки поля, під час переміщення з якої в нескінченність заряду в 1 Кл сили поля виконують роботу в 1 Дж.

Для потенціалу також виконується принцип суперпозиції, тому потенціал точки поля системи N точкових зарядів дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, що створюються в цій точці кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i}.$$

Геометричне місце точок поля з однаковим потенціалом називають *еквіпотенціальною поверхнею*.

2.2.5. Електроємність, конденсатори

Відношення приросту заряду провідника до приросту його потенціалу має певне і стале для даного провідника значення

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \phi}.$$

Потенціал відокремленого провідника дорівнює нулю за рівності нулю його заряду. Тому не тільки приріст потенціалу пропорційний до приросту заряду, а й саме значення потенціалу провідника пропорційне до значення його заряду:

$$C = \frac{q}{\phi}.$$

Коефіцієнт пропорційності C називають *електроємністю* провідника, або просто *ємністю*.

Ємність чисельно дорівнює заряду, надання якого певному провіднику змінює його потенціал на одиницю. За одиницю ємності в системі СІ беруть ємність такого провідника, потенціал якого змінюється на 1 вольт за надання йому заряду в 1 кулон. Цю

одиницю називають *фарадою* $\Phi = \frac{\hat{E}\hat{e}}{\hat{A}}$.

Одиниця 1 Φ дуже велика, і на практиці використовують менші одиниці: мікро (мкФ)-, нано (нФ)- і піко (пФ) фаради.

Ємністю конденсатора (*не плутати з ємністю відокремленого провідника*) називають відношення заряду, зосередженого на одній з обкладок, до різниці потенціалів між ними:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U}.$$

Різницю потенціалів $U = \phi_1 - \phi_2$ між обкладками конденсатора називають *напругою*.

Розрахунок електроємності конденсаторів

1. Плоский конденсатор складається з двох паралельних пластин площею S , відокремлених проміжком завтовшки d , заповненим діелектриком із проникністю ϵ , його електроємність

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

2. Кульовий конденсатор складається з двох концентричних металевих сфер радіусів R_1 і R_2 , простір між якими заповнено діелектриком із проникністю ϵ , ємність кульового конденсатора

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{1/R_1 - 1/R_2}.$$

Якщо зовнішня сферична поверхня перебуває на дуже великій відстані ($R_2 \rightarrow \infty$), то ємність відокремленої сферичної поверхні дорівнює

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R.$$

2.2.6. Енергія електричного поля

Здатність електростатичного поля переміщувати електричні заряди, тобто виконувати певну роботу з їх переміщення, говорить про те, що електростатичне поле має енергію. Знайдемо енергію поля, що створюється провідником ємності C із зарядом q . Загальний заряд q , що міститься на поверхні провідника, можна розглядати як суму точкових зарядів Δq . Енергія точкового заряду Δq у полі всіх інших зарядів визначається добутком абсолютної величини цього заряду Δq на потенціал, який створюють інші заряди в точці, де міститься заряд Δq , тоді енергія довільної системи точкових зарядів:

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_i \Delta q_i \varphi_i.$$

Тут φ_i — потенціал, створюваний усіма іншими зарядами, окрім Δq_i , у тій точці, де міститься заряд Δq_i . Беручи до уваги однаковість потенціалу всіх точок провідника, знаходимо:

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_i \Delta q_i \varphi = \frac{1}{2} \varphi \sum_i \Delta q_i = \frac{1}{2} q \varphi.$$

Електростатична енергія провідника (конденсатора):

$$W_p = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{q^2}{2C} = \frac{C \varphi^2}{2}.$$

Справді, процес заряджання конденсатора від q до $q + dq$ можна розглядати як перенесення заряду dq з однієї пластини на другу. Робота, що виконується при цьому, дорівнює приросту енергії конденсатора $dW_p = U dq = \frac{1}{C} q dq$ ($U = \varphi_1 - \varphi_2$ — різниця потенціалів між обкладками), звідси, виконавши інтегрування, дістанемо:

$$W_p = \frac{1}{C} \int_0^q q dq = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

2.2.7. Сила струму. Густина струму

Електричним струмом називають упорядкований (напрялений) рух електричних зарядів. За напрям струму беруть напрям руху позитивних зарядів або напрям, протилежний напрямку руху негативних зарядів.

Для виникнення електричного струму необхідна присутність вільних заряджених частинок, які могли б рухатись у межах усього тіла або середовища. Такі частинки називають *носіями струму*. Роль носіїв струму можуть виконувати: електрони, іони або макроскопічні частинки, які мають надлишковий заряд.

У металах можуть вільно рухатися тільки електрони. Тому електричний струм у металах — це впорядкований рух вільних електронів (електронів провідності). У розчинах (електроліти), які здатні проводити струм, вільних електронів немає, провідність таких розчинів зумовлена рухливістю іонів.

Кількісною характеристикою електричного струму є заряд, що переноситься через повний переріз провідника за одиницю часу. Її називають *силою струму*

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Оскільки dq і dt — скаляри, то й сила струму є скалярною величиною. Якщо величина I не змінюється з плином часу:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Для докладної характеристики струму в кожній точці перерізу використовують вектор густини струму. За модулем цей вектор дорівнює відношенню сили струму dI , що протікає через площу dS_{\perp} , перпендикулярну напрямку руху зарядів, до цієї площі:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

За напрям вектора густини струму \vec{j} беруть напрям вектора середньої швидкості, напрямленого впорядкованого руху позитивних зарядів $\langle u^+ \rangle$.

2.2.8. Сторонні сили. Електрорушійна сила

Для існування постійного електричного струму всередині провідника необхідне постійне електричне поле ($\vec{E} = \text{const} \neq 0$).

Нагадаємо, що в електростатиці поле всередині провідника відсутнє ($\vec{E} = 0$). Якщо не вживати заходів щодо підтримання постійного електричного поля всередині провідника, то, внаслідок переміщення позитивних зарядів від точок з більшим потенціалом до точок із меншим потенціалом, а негативних зарядів у протилежному напрямі, поле в провіднику швидко зникне і струм припиниться. Отже, для того щоб достатній час підтримувати струм, повинні бути такі ділянки електричного кола, де рух позитивних зарядів відбувається від точок із меншим потенціалом до точок із більшим потенціалом, а негативних зарядів — у протилежному напрямі.

Найбільш відомим джерелом сторонніх сил є гальванічний елемент — батарейка. Якщо сучасний гальванічний елемент приєднати до електричного кола, то всередині елемента починає відбуватися хімічна реакція і в електричному колі з'являється струм. При цьому в зовнішній частині електричного кола позитивні заряди під дією електростатичних сил переміщуються від позитивного електрода (більший потенціал) до негативного (менший потенціал), а всередині гальванічного елемента (у внутрішній частині електричного кола) — навпаки: позитивні заряди рухаються від негативного електрода до позитивного. Саме всередині гальванічного елемента за рахунок роботи сторонніх сил позитивні заряди рухаються в напрямі більшого потенціалу, тобто проти електростатичних сил.

Сторонні сили характеризують електрорушійною силою (ЕРС) \mathcal{E} , яка дорівнює роботі, що її виконують сторонні сили за переміщення одиничного позитивного заряду замкненим колом, або на ділянці дії сторонніх сил:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \oint_l (E_{\text{ст}}^r, dl)^r.$$

Розмірність \mathcal{E} збігається з розмірністю потенціалу і визначається у вольтах: $[\mathcal{E}] = \text{В}$ (вольт).

Ділянки електричного замкнутого кола, на яких сторонні сили не діють (джерела струму відсутні), називають *однорідними*, а ділянки кола, на яких сторонні сили діють (джерела струму присутні), називають *неоднорідними*.

2.2.9. Закон Ома для однорідної ділянки електричного кола

Електричний струм — це впорядкований рух електричних зарядів під дією електричного поля. Напрявлений рух зарядів дістав назву *дрейфового*.

Виразу для густини струму можна надати вигляду

$$j = \frac{dq}{dt dS_{\perp}} = |q^+| n^+ \langle u^+ \rangle + |q^-| n^- \langle u^- \rangle,$$

де n^+ та n^- — концентрації позитивних і негативних носіїв струму. Середня швидкість дрейфового руху вільних носіїв струму пропорційна до напруженості прикладеного електричного поля

$$\langle u \rangle = u_0 E.$$

Коефіцієнт пропорційності u_0 , який має назву *рухливості носіїв струму*, дорівнює середній швидкості дрейфового руху зарядів за напруженості поля 1 В/м. Тоді попередній вираз можна подати у вигляді

$$j = (q^+ n^+ u_0^+ + q^- n^- u_0^-) E,$$

де u_0^+ і u_0^- — значення рухливості відповідно для позитивних і негативних носіїв струму.

Величину

$$\sigma = (q^+ n^+ u_0^+ + q^- n^- u_0^-)$$

називають *питомою електричною провідністю* матеріалу або просто *електропровідністю*.

Величину, обернену до питомої електропровідності, називають *питомим електричним опором* матеріалу

$$\rho = 1/\sigma.$$

Тоді

$$j = \sigma E = E/\rho.$$

Це є аналітичний запис *закона Ома в диференціальній формі*.

Розмірність питомого опору і питомої електропровідності відповідно Ом·м і 1/(Ом·м). Одиницю, обернену до Ом, називають сіменсом ($\tilde{\text{Н}} = 1/\tilde{\Omega}$). Відповідно одиницею електропровідності є сіменс на метр ($\tilde{\text{Н}}/\text{м}$).

Цей самий результат можна дістати, скориставшись *експериментально встановленим Омом законом*, згідно з яким сила струму, що проходить уздовж металевого провідника, пропорційна до спаду напруги $I = U/R$ (закон Ома). Літерою R позначено опір провідника, який залежить від форми і розмірів провідника, а також від властивостей матеріалу, з якого він зроблений

$$R = \rho \frac{l}{S_{\perp}}$$

(l — довжина провідника, S_{\perp} — площа поперечного перерізу, ρ — питомий електричний опір матеріалу).

2.2.10. Закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола та для замкнутого кола

Розглянемо неоднорідну ділянку кола 1—2, на якій разом з електростатичними, тобто кулонівськими силами, діють сторонні сили, здатні спонукати впорядкований рух носіїв струму, як і сили кулонівські. Тоді у виразі для закону Ома в диференціальній формі поряд із напруженістю кулонівського поля слід врахувати напруженість поля сторонніх сил

$$j = \frac{1}{\rho} (E_{\text{е}} + E_{\text{нб}}). \text{ або } \frac{I}{S_{\perp}} \rho = (E_{\text{е}} + E_{\text{нб}}).$$

Помножимо ліву і праву частини рівняння на dl і зінтегруємо від точки 1 до точки 2:

$$I \int_1^2 \rho \frac{dl}{S_{\perp}} = \int_1^2 E_{\text{е}} dl + \int_1^2 E_{\text{нб}} dl.$$

Вираз $\rho \frac{dl}{S_{\perp}}$ являє собою опір контуру довжиною dl , а інтеграл цього виразу — опір R_{12} ділянки 1—2. Перший інтеграл у правій частині дає різницю потенціалів $\int_1^2 E_{\text{е}} dl = \varphi_1 - \varphi_2$, а другий $\int_1^2 E_{\text{ст}} dl = \mathcal{E}_{12}$ — ЕРС, що діє на ділянці 1—2. Отже, ми приходимо до формули

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

Це закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола.

Ліву його частину називають *спадом напруги на ділянці кола* і позначають U . Маємо:

$$U_{12} = IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

Вочевидь, чисельно спад напруги дорівнює роботі, яку виконують кулонівські та сторонні сили під час переміщення одиничного позитивного заряду на ділянці 1—2.

ЕРС \mathcal{E}_{12} , як і сила струму, — величина алгебраїчна. У разі сприяння руху позитивних зарядів в обраному напрямі 1—2, $\mathcal{E}_{12} > 0$, якщо навпаки, то $\mathcal{E}_{12} < 0$.

Якщо на ділянці електричного кола 1—2 відсутні джерела сторонніх сил, вираз набирає вигляду закону Ома для однорідної ділянки

$$U_{12} = IR = \varphi_1 - \varphi_2,$$

де R — опір ділянки кола без ЕРС, тобто зовнішньої ділянки кола.

У випадку замкненого кола (перерізи в точках I і 2 об'єднуються) потенціал точки 1 дорівнює потенціалу точки 2 ($\varphi_1 = \varphi_2$), і ми дістаємо закон Ома для замкненого кола:

$$IR_{12} = \mathcal{E}_{12}.$$

Повний опір R_{12} поділяють на дві частини: R — опір кола без ЕРС і r — внутрішній опір джерела ЕРС ($R_{12} = R + r$).

Тоді закон Ома для замкненого кола можна записати у вигляді

$$I(R+r) = \mathcal{E},$$

де під \mathcal{E} розуміють суму всіх ЕРС, що діють у замкненому колі.

2.2.11. Потужність струму. Закон Джоуля—Ленца

Робота, яку виконують електростатичні сили на однорідній ділянці замкненого електричного кола під час протікання струму, пов'язана з перенесенням за час dt заряду $dq = I dt$ від одного кінця ділянки кола до іншого, спад напруги між якими становить U :

$$dA = IUdt.$$

Потужність електричного струму на цій ділянці кола дорівнює

$$P = \frac{dA}{dt} = IU.$$

При цьому форма енергії, яка виділяється під час проходження струму, залежить від природи фізичних явищ, що зумовлюють спад напруги. Так, спад напруги на клеммах двигуна постійного струму зумовлюється механічною роботою, яку виконує двигун, а спад напруги на клеммах акумулятора під час його зарядження пов'язаний із хімічними перетвореннями.

Нарешті, спад напруги на омичному опорі провідників супроводжується виділенням теплоти.

Якщо все падіння напруги відбувається на омичному опорі провідників, то згідно із законом Ома $U = IR$. У цьому випадку вся енергія виділяється у вигляді теплоти з потужністю

$$P = IU = I^2 R.$$

Це формула закону Джоуля—Ленца для однорідної ділянки електричного кола. Він був відкритий у 1841 р. Дж. Джоулем, а потім детально досліджений Ленцем.

Вочевидь, що за час t у провіднику виділиться кількість теплоти

$$Q = IUt = I^2 Rt.$$

2.2.12. Коефіцієнт корисної дії джерела ЕРС

Коефіцієнтом корисної дії (ККД) η джерела ЕРС називають величину відношення потужності P , що виділяється в зовнішній частині електричного кола, до загальної потужності P_0 джерела ЕРС.

Коефіцієнт корисної дії показує, яка частина роботи сторонніх сил перетворюється в електричну енергію і віддається у зовнішнє електричне коло.

Потужність у зовнішньому електричному колі дорівнює $P = IU$, а потужність джерела ЕРС $P_0 = I\mathcal{E}$. Тоді

$$\eta = \frac{IU}{I\mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}},$$

тобто ККД дорівнює відношенню спаду напруги у зовнішньому колі до ЕРС.

Спад напруги у зовнішньому колі менший за ЕРС на значення спаду напруги всередині самого джерела струму. Отже,

$$\eta = \frac{\mathcal{E} - Ir}{\mathcal{E}} = 1 - \frac{Ir}{\mathcal{E}}.$$

ККД можна виразити через зовнішній і внутрішній опори, а саме: $U = IR$ і $\mathcal{E} = I(R + r)$. У результаті

$$\eta = \frac{R}{R + r} = \frac{1}{1 + r/R}.$$

2.2.13. Задачі

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Дві однакові кульки масою $m = 1$ г кожна підвішено на нитках завдовжки $l = 1$ м. Нитки причеплено до стелі в одній точці. Коли кулькам надали однакових зарядів, відповідні нитки розійшлися на кут 60° . Якого заряду набула кожна кулька?

Розв'язання. Нитки, на яких підвішено кульки (рис. 2.14), розходяться, бо кульки, заряджені *однойменними зарядами*, відштовхуються. Якби на кульки діяли тільки сили відштовхування, то нитки б розійшлися на кут 180° , але кульки мають масу, і тому з боку Землі, на них діють сили тяжіння. У боротьбі гравітаційних сил mg і кулонівських сил F_k і визначається кут β , на який відхиляються нитки.

З рис. 2.14 випливає:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_\epsilon}{mg}.$$

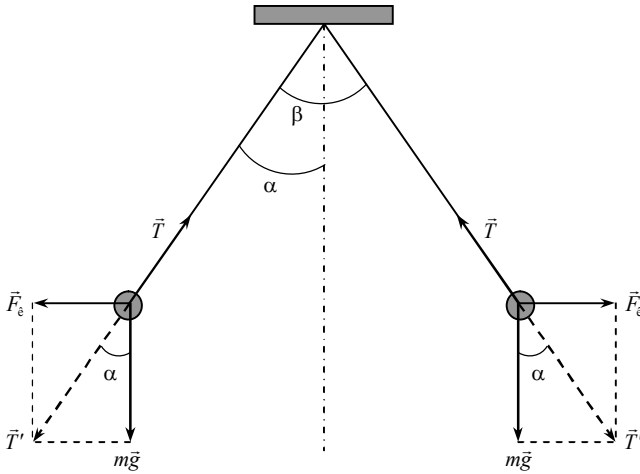


Рис. 2.14

Пригадавши закон Кулона і врахувавши, що заряди однакові, дістанемо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2 mg}.$$

Оскільки нас цікавить заряд кульки, перепишемо це рівняння так:

$$q = R\sqrt{4\pi\epsilon\epsilon_0 mg \cdot \operatorname{tg} \alpha}.$$

У цій формулі R — відстань між кульками, яку можна обчислити за формулою:

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

тоді остаточна формула для обчислення заряду набере вигляду

$$q = \sqrt{4\pi\epsilon\epsilon_0 mg \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot 2l \sin \alpha.$$

Підставивши значення величин, що входять у здобуту формулу, знайдемо:

$$q = \sqrt{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 0,58 \cdot 2 \cdot 1,0 \cdot 0,5} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

Відповідь. Заряд кульки становить $0,8 \cdot 10^{-6}$ Кл.

Задача 2. Ділянка кола складається зі сталевого дроту завдовжки $l_1 = 2$ м і площею поперечного перерізу $S_1 = 0,48$ мм², з'єданого послідовно з нікеліновим дротом завдовжки $l_2 = 1$ м і площею поперечного перерізу $S_2 = 0,21$ мм². Яку напругу потрібно підвести до ділянки, щоб дістати силу струму $I = 0,6$ А? Питомі опори сталі $\rho_1 = 12 \cdot 10^{-8}$ Ом · м і нікеліну $\rho_2 = 42 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

Розв'язання. Провідники з'єднані послідовно, тому електрична схема має такий вигляд (рис. 2. 15).

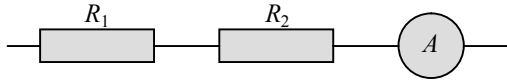


Рис. 2.15

Для розв'язування задачі необхідно використати закон Ома для однорідної ділянки кола:

$$I = \frac{U}{R}, \quad \text{звідки} \quad U = IR,$$

де R — загальний зовнішній опір електричного кола.

Оскільки провідники з'єднані послідовно, то $R = R_1 + R_2$.

З умови задачі відомі розміри і матеріал, з якого виготовлені опори, тому значення опорів R_1 і R_2 можна обчислити за формулами:

$$R_1 = \rho_1 \frac{l_1}{S_1} \quad \text{і} \quad R_2 = \rho_2 \frac{l_2}{S_2}. \quad \text{Тоді} \quad U = I \left(\rho_1 \frac{l_1}{S_1} + \rho_2 \frac{l_2}{S_2} \right).$$

Підставивши значення величин, що входять у здобуті формули, дістанемо:

$$U = 0,6 \left(12 \cdot 10^{-8} \frac{2,0}{0,48 \cdot 10^{-6}} + 42 \cdot 10^{-8} \frac{1,0}{0,21 \cdot 10^{-6}} \right) = 1,5 \text{ В.}$$

Відповідь. До ділянки потрібно підвести напругу 1,5 В.

Задача 3. Елемент спочатку замикають на зовнішній опір $R_1 = 2,0$ Ом, а потім на зовнішній опір $R_2 = 0,5$ Ом. Знайти ЕРС елемента і його внутрішній опір, коли відомо, що в кожному з цих випадків потужність, яка розвивається в зовнішньому колі, однакова і дорівнює 2,54 Вт.

Розв'язання. Застосуємо до першого і другого випадків закон Ома для повного кола:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}.$$

Потужність, яку розвиває струм у зовнішньому колі, дорівнює

$$P = I^2 R.$$

За цією формулою можна знайти силу струму при замиканні елемента на опори R_1 і R_2 :

$$I_1 = \sqrt{\frac{P}{R_1}}; \quad I_2 = \sqrt{\frac{P}{R_2}}.$$

Підставивши ці значення в першу формулу, дістанемо:

$$\sqrt{\frac{P}{R_1}} = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; \quad \sqrt{\frac{P}{R_2}} = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}.$$

Зі здобутих рівнянь легко знайти невідомі величини, поділивши перше рівняння на друге:

$$\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = \frac{R_2 + r}{R_1 + r},$$

або

$$0,5 = \frac{R_2 + r}{R_1 + r}; \quad 0,5 R_1 + 0,5 r = R_2 + r.$$

Тоді

$$r = \frac{0,5 R_1 - R_2}{0,5}.$$

Підставивши це значення r у перше рівняння, знайдемо значення ЕРС елемента:

$$\mathcal{E} = \sqrt{\frac{P}{R_1}} (R_1 + r).$$

Підставивши значення величин, що входять у здобуті формули, знайдемо:

$$r = \frac{0,5 \cdot 2,0 - 0,5}{0,5} = 1,0 \text{ Ом}, \quad \mathcal{E} = \sqrt{\frac{2,54}{1,0}} (2,0 + 1,0) = 3,4 \text{ В}.$$

Відповідь. Електрорушійна сила джерела струму становить 3,4 В, внутрішній опір — 1,0 Ом.

Задача 4. На кінцях ніхромового провідника ($\rho = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом \cdot м) довжиною 1,5 м і діаметром перерізу 0,6 мм підтримується напруга 10 В. Визначити потужність, що споживається, кількість теплоти, яка виділяється в провіднику за 1 годину.

Розв'язання. Потужність, що виділяється в провіднику, визначається за формулою: $N = IU$.

Силу струму знайдемо за законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Виразивши опір R через довжину l і діаметр поперечного перерізу провідника, дістанемо:

$$I = \frac{US}{\rho l} = \frac{\pi d^2 U}{4\rho l},$$

де ρ — питомий опір матеріалу провідника. Тоді знайдемо

$$N = \frac{\pi d^2 U^2}{4\rho l}.$$

Розрахунки із застосуванням одиниць СІ дають $N = 17,1$ Вт.

Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику, визначається за формулою

$$Q = IUt = Nt. \quad \text{Звідси } Q = 6,16 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Відповідь. Потужність, що споживається, дорівнює 17,1 Вт, кількість теплоти, яка виділяється в провіднику за 1 годину, становить $6,16 \cdot 10^4$ Дж.

Аудиторні задачі

1. Визначити швидкість руху електрона по коловій орбіті радіуса $r = 53$ пм навколо ядра атома водню. ($2,2 \cdot 10^6$ м/с)
2. Три однакові позитивні заряди, по 1 нКл кожний, розміщено у вершинах рівностороннього трикутника. Який негативний заряд потрібно помістити в центрі трикутника, щоб сила притягання з його боку зрівноважила сили взаємного відштовхування зарядів, які містяться у вершинах? (580 пКл)
3. Заряд $q_1 = 100$ нКл рівномірно розподілено по поверхні диска, радіус якого $R = 3$ см. Визначити силу, з якою заряд диска діє на точковий заряд $q_2 = 1$ нКл, що міститься на відстані $h = 8$ см від центра диска вздовж його осі. (0,13 мН)
4. У плоскому горизонтально розміщеному конденсаторі заряджена краплина ртуті перебуває в рівновазі, коли напруженість електричного поля становить 80 кВ/м. Заряд краплини дорівнює 870 нКл. Знайти радіус краплини. (5 мм)
5. Електрон вилетів у плоский конденсатор, перебуваючи на однаковій відстані від кожної пластини зі швидкістю 10^6 м/с, паралельно пластинам, відстань d між якими дорівнює 2 см. Довжина l кожної пластини дорівнює 10 см. Яку найменшу різницю потенціалів потрібно прикласти між пластинами, щоб електрон не вилетів з конденсатора? (0,23 В)
6. Електричне поле створено двома точковими зарядами $q_1 = 10$ нКл і $q_2 = -20$ нКл, що перебувають на відстані $d = 20$ см один від одного. Визначити напруженість поля в точці, віддаленій від першого заряду на $r_1 = 30$ см і від другого — на $r_2 = 50$ см. (280 В/м)

7. Точкові заряди $q_1 = 1$ мкКл і $q_2 = 0,1$ мкКл містяться на відстані $r_1 = 10$ см один від одного. Яку роботу A виконають сили поля, якщо другий заряд, відштовхнувшись від першого, віддаляться на відстань: 1) $r_2 = 10$ м; 2) $r_3 = \infty$? (8,91 мДж; 9 мДж)

8. Срібним провідником перерізом $S = 1$ мм² проходить струм $I = 1$ А. Обчислити середню швидкість дрейфу електронів у цьому провіднику, вважаючи, що кожний атом срібла дає один електрон провідності. ($\approx 0,01$ см/с)

9. Чому дорівнює напруженість поля в алюмінієвому провіднику поперечним перерізом $S = 1,4$ мм² при силі струму 1 А? Питомий опір алюмінію $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом \cdot м. (20 мВ/м)

10. У мідному провіднику довжиною 3 м і площею поперечного перерізу $S = 1$ мм² проходить струм. Визначити кількість теплоти, яка виділиться за 1 хв, якщо напруженість електричного поля у провіднику 0,2 В/м. (426 Дж)

11. Потрібно виготовити нагрівну спіраль для електричної плитки потужністю 0,5 кВт, яку необхідно буде вмикати в мережу з напругою 220 В. Скільки метрів потрібно буде взяти для цього ніхромового дроту діаметром 0,4 мм? Питомий опір ніхрому в нагрітому стані дорівнює 1,05 мкОм \cdot м. (12 м)

2.3. НАВЧАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ МАГНЕТИЗМ

2.3.1. Взаємодія струмів. Магнітне поле, магнітна індукція

У 1820 році А. Ампер встановив, що два паралельні провідники, якими проходить електричний струм, притягуються, якщо струми мають однаковий напрям, і відштовхуються, якщо струми протилежні. Сила взаємодії, що припадає на *одиницю довжини* кожного з провідників, пропорційна до добутку струмів I_1 та I_2 в них і обернено пропорційна до відстані b між ними:

$$F_{\text{іа}} = 2k \frac{I_1 I_2}{b}.$$

Це закон Ампера для нескінченних паралельних провідників. Коефіцієнт взято $2k$ з метою спрощення виразу для магнітної сталі.

Він відіграв важливу роль щодо встановлення одиниці сили струму. Одиниця сили струму в системі СІ — ампер визначається як сила постійного струму, який, проходячи двома паралельними провідниками нескінченної довжини і вкрай малого поперечного перерізу, що розміщені на відстані 1 м один від одного у вакуумі,

викликає між цими провідниками силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ на кожний метр довжини. Відповідно до цього заряд в один кулон визначається як заряд, що проходить за 1 с через поперечний переріз провідника, яким тече постійний струм 1 А ($Кл = \text{А} \cdot \text{с}$).

У раціональній формі закон Ампера набирає вигляду

$$F_{ia} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b},$$

де μ_0 — магнітна стала. Для її відшукання скористаємося тим, що згідно з визначенням сили струму в один ампер ($I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$, $b = 1 \text{ м}$) сила взаємодії дорівнює $F_{ia} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} / \text{і}$. Підставляючи ці значення у формулу, знаходимо магнітну сталу та її розмірність:

$$2 \cdot 10^{-7} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2 \cdot 1 \cdot 1}{1} \Rightarrow \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,26 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = \frac{\text{В}}{\text{і}} \right).$$

Взаємодія струмів відбувається через поле, яке називають *магнітним*. Із дослідів Ерстеда випливає, що магнітне поле має напрямлений характер, тому воно мусить характеризуватися векторною величиною. Цю величину позначають літерою B . Основну силову характеристику магнітного поля назвали *магнітною індукцією*.

Магнітне поле на відміну від електричного не діє на нерухомий заряд. Сила виникає лише тоді, коли заряд рухається.

Досліди переконують, що для магнітного поля, як і для електричного, виконується *принцип суперпозиції*: поле B , що породжується кількома рухомими зарядами (струмами), дорівнює векторній сумі полів B_i , які породжуються кожним рухомим зарядом (струмом) окремо:

$$B = \sum_i^N B_i.$$

2.3.2. Закон Біо—Савара—Лапласа

Майже одночасно з Ампером у 1820 році магнітні властивості струмів, що протікають тонкими (лінійними) провідниками різної форми, вивчали Біо і Савар. Лаплас провів аналіз їхніх експериментальних даних і дійшов висновку, що магнітне поле довільного струму можна розрахувати як векторну суму (суперпозицію) полів, створених окремими елементарними ділянками струмів.

Виділимо в деякому дуже тонкому провіднику (рис. 2.16), яким протікає постійний електричний струм I , елемент довжиною dl . Введемо вектор $d\vec{l}$, що збігається за напрямом з вектором густини струму: $\vec{j}dl = j d\vec{l} \Rightarrow d\vec{l} = dl \cdot (\vec{j} / j) = dl \cdot \vec{e}_j$, де \vec{e}_j — орт густини струму. Елементом струму називатимемо вектор $I d\vec{l}$, модуль якого дорівнює $I dl$, а напрям збігається з напрямом вектора густини струму в даній точці провідника.

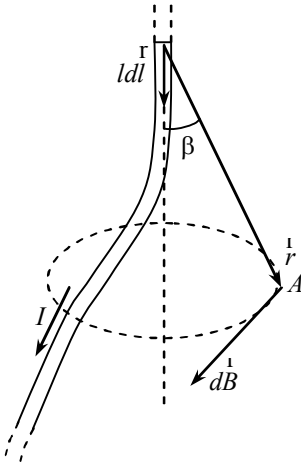


Рис. 2.16

Цей елемент струму навколо провідника створює магнітне поле, що визначається законом Біо—Савара—Лапласа: елемент струму $I d\vec{l}$ створює в точці простору з радіус-вектором \vec{r} магнітне поле з індукцією

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Модуль вектора $d\vec{B}$ дається виразом

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \beta}{r^2}.$$

Напрямок вектора $d\vec{B}$ визначається векторним добутком $[d\vec{l}, \vec{r}]$, тобто він перпендикулярний до площини, утвореної векторами $d\vec{l}$ і \vec{r} .

Цей напрям визначають за правилом правого свердлика (гвинта): напрям магнітного поля збігається з напрямом руху кінця рукоятки свердлика з правою нарізкою, вістря якого рухається поступально за напрямом струму.

Кожний елемент струму провідника створює в точці A власне магнітне поле $d\vec{B}$. Щоб знайти сумарний вектор індукції магнітного поля \vec{B} в точці A , потрібно знайти векторну суму (суперпозицію) всіх полів $d\vec{B}$, створюваних кожним елементом струму окремо. Для нескінченно малих елементів струму така сума подається інтегралом, а в разі постійних струмів, які з необхідністю є замкненими, це поле дорівнює

$$\vec{B} = \oint \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

де інтегрування проводиться за всією довжиною замкнутого провідника l .

2.3.3. Сила Лоренца

На заряд, який рухається в магнітному полі, діє сила, з напрямом (з напрямом струму), можемо вираз для сили записати у вигляді

$$F = qvB \sin \alpha$$

(тут α — це кут між векторами \vec{v} і \vec{B} ; v — швидкість руху позитивних зарядів). Здобутий результат можна подати у вигляді векторної формули

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

Напрямок сили перпендикулярний до напрямку швидкості \vec{v} і магнітної індукції \vec{B} та підпорядковується правилу правого свердлика (правого гвинта) у разі позитивного заряду. Для негативного заряду напрями векторів \vec{F} і $[\vec{v}, \vec{B}]$ протилежні (рис. 2.17). Вираз для сили вивів Лоренц, і вона дістала назву *сили Лоренца*.

Оскільки магнітна сила завжди напрямлена перпендикулярно до швидкості зарядженої частинки, вона роботи над частинкою не виконує. Отже, діючи на заряджену частинку постійним магнітним полем, ми не можемо змінити її енергію, змінювати можна тільки напрям швидкості. Якщо частинка рухається вздовж магнітного поля, останнє взагалі не діє на неї.

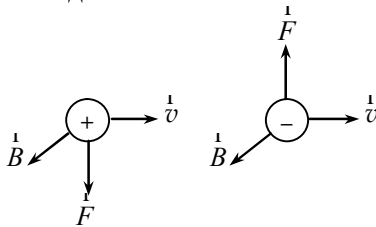


Рис. 2.17

У випадку існування одночасно електричного і магнітного полів, сила Лоренца, що діє на заряджену частинку, така:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

2.3.4. Робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі. Магнітний потік.

Оскільки на провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера, то під час переміщення провідника виконується певна робота. Знайдемо цю роботу.

Припустимо, що прямий провідник завдовжки l , що входить до кола зі струмом, переміщується поступально і паралельно самому собі на відстань dx , переходячи з положення 1 у положення 2 (рис. 2.18). Вважатимемо, що магнітне поле, напрямлене на нас (його позначено точками), перпендикулярне до dx і l .

Згідно з законом Ампера на провідник діє сила $F = IlB$, яка виконує додатну механічну роботу $dA = Fdx = IlBdx = IBdS$, де $dS = ldx$ — заштрихована площа.

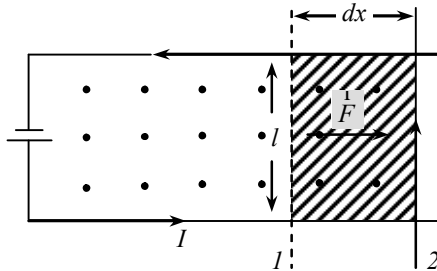


Рис. 2.18

Якщо індукція \vec{B} напрямлена під кутом до заштрихованої площі, то її завжди можна розкласти на складову B_n , перпендикулярну до dS , і складову B_τ , паралельну dS . Оскільки сила \vec{F} завжди перпендикулярна до поля \vec{B} , то складова B_τ викликати сили, перпендикулярну до dx . А це означає, що механічна робота цієї сили дорівнює нулю. Тому $dA = IB_n dS$.

Магнітним потоком, або потоком вектора магнітної індукції, крізь площу S (рис. 2.19) називають величину

$$\Phi_B = BS \cos \alpha = B_n S,$$

де α — кут між нормаллю \vec{n} і вектором \vec{B} , а B_n — проекція вектора B на нормаль \vec{n} . Магнітний потік є скалярною величиною.

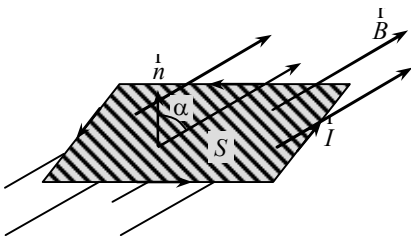


Рис. 2.19

Магнітний потік характеризується не тільки своєю абсолютною величиною, а й знаком, залежно від того, який знак має $\cos \alpha$. Цей знак залежить від вибору додатного напрямку нормалі \vec{n} . В усіх електромагнітних явищах завжди доводиться розглядати магнітний потік у зв'язку зі

струмом, що обтікає контур. Тому додатний напрям нормалі природно пов'язують із напрямом струму, вважаючи, що додатний напрям нормалі до площини, яку охоплює струм, збігається з напрямом переміщення свердлика з правою нарізкою.

У системі СІ потік виражають у веберах ($\hat{A} \hat{a} = \hat{O} \hat{e} \cdot i^2$).

використовуючи поняття потоку, можемо вираз роботи подати у вигляді

$$dA = Id\hat{O}_B.$$

Тут dA — робота, виконувана силами магнітного поля, а $d\hat{O}$ — приріст магнітного потоку крізь контур.

Якщо провідник (контур) виконує скінченне переміщення, то

$$A_{12} = I(\hat{O}_2 - \hat{O}_1),$$

де \hat{O}_1 і \hat{O}_2 — значення магнітного потоку крізь контур відповідно в початковому і кінцевому положенні. Наголосимо, що робота виконується не за рахунок *енергії* зовнішнього магнітного поля, а за рахунок джерела, що підтримує незмінним струм у контурі.

2.3.5. Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції Фарадея.

Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні електричного струму в замкненому провіднику під час зміни магнітного потоку, що пронизує поверхню, обмежену контуром провідника. Цей струм називають індукційним. ЕРС індукції

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Формула виражає закон електромагнітної індукції Фарадея.

Індукційний струм може виникати і в нерухомому замкненому провіднику (у цьому разі сила Лоренца не діє, оскільки провідник нерухомий). Для цього слід рухати замість провідника постійний магніт. Замість постійного магніту можна взяти котушку, якою проходить змінний струм. Останній збуджує змінне магнітне поле, і тому ЕРС індукції виникає в нерухомому замкненому провіднику за нерухої котушки. Усі ці приклади свідчать, що для збудження індукційного струму істотною є лише зміна магнітного потоку крізь контур провідника, а не спосіб, в який ця зміна досягається.

Закон Фарадея констатує нове фізичне явище: *змінне магнітне поле породжує електричне поле*. Тепер ми знаємо, що електричне поле породжується не тільки електричними зарядами, а також і змінним магнітним полем.

У 1834 році російський фізик Е. Х. Ленц установив правило, за яким визначається напрям індукційного струму — *правило Ленца*: індукційний струм має такий напрям, що створений ним магнітний потік перешкоджає зміні магнітного потоку, який викликав появу індукційного струму.

У масивних провідниках, що рухаються в магнітних полях або розміщені у змінних магнітних полях, збуджуються індукційні струми. За своєю фізичною природою вони нічим не відрізняються від індукційних струмів у лінійних провідниках. Такі струми називають *вихровими*, або *струмами Фуко*. Електричний опір масивного провідника малий, тому струми Фуко можуть досягати великих значень. Ці струми замикаються безпосередньо в об'ємі провідника у вигляді вихороподібних замкнених ліній.

За правилом Ленца струми Фуко вибирають всередині провідника такі шляхи і напрями, щоб своєю дією якомога сильніше протидіяти причині, яка їх викликає, тобто зміні потоку магнітної індукції. Ось чому класичні металеві провідники, що рухаються в сильному магнітному полі, зазнають сильного гальмування, зумовленого взаємодією струмів Фуко з магнітним полем.

2.3.6. Самоіндукція. Індуктивність

Будь-який контур струму створює деякий потік магнітної індукції. Цей потік змінюватиметься зі зміною сили струму в контурі. А зміна магнітного потоку згідно з законом електромагнітної індукції збудить у контурі електрорушійну силу індукції. Остання і зумовлює появу додаткового струму в контурі. Таке явище називають *самоіндукцією*, а додатковий струм — *екстраструмом самоіндукції*. Отже, ЕРС індукції, яка виникає в будь-якому контурі внаслідок зміни магнітного потоку, створюваного змінним струмом цього контуру, називають ЕРС самоіндукції. За правилом Ленца струм самоіндукції завжди напрямлений так, що протидіє зміні струму, який викликає самоіндукцію.

Повний потік магнітної індукції Φ крізь фіксовану нерухому площу також пропорційний до сили струму, і тому

$$\Phi = LI.$$

Коефіцієнт пропорційності L називають *коефіцієнтом самоіндукції*, або *індуктивністю контуру*.

За одиницю індуктивності в системі СІ беруть індуктивність такого провідника, у контурі якого виникає повний магнітний потік 1 Вб за сили струму 1 А.

Цю одиницю називають *генрі* $[L] = 1 \text{ \AA i} = 1 \frac{\text{А}\cdot\text{м}}{\text{А}}$.

Індуктивність дуже довгого соленоїда:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V$$

де V — об'єм соленоїда; n — кількість витків на одиницю довжини. За межами соленоїда поле дорівнює нулю.

$$\text{ЕРС самоіндукції} \quad \mathcal{E}_{\text{с інд}} = -L \frac{dI}{dt}.$$

За правилом Ленца додатковий струм, зумовлений самоіндукцією, завжди напрямлений так, щоб перешкоджати зміні струму в електричному колі. Це призводить до того, що встановлення струму під час замикання електричного кола і спадання струму під час розімкнення кола відбувається не миттєво, а поступово.

2.3.7. Задачі

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Протон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 10^{-3} Тл, зі швидкістю 1,6 км/с. Вектор швидкості напрямлений перпендикулярно до ліній напруженості. Знайти: 1) силу, з якою поле діє на протон; 2) радіус кола, по якому він рухається; 3) його нормальне і тангенціальне прискорення.

Розв'язання. Оскільки протон рухається в магнітному полі, сила, яка на нього діє, називається силою Лоренца

$$F_E = qvB \sin \alpha;$$

$$F = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 = 2,56 \cdot 10^{-19} \text{ Н,}$$

Протон рухається перпендикулярно до силових ліній, тому його траєкторія — замкнене коло, радіус якого можна обчислити за формулою

$$R = \frac{mv}{qB}; \quad R = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 1,6 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3}} = 1,67 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Сила Лоренца діє перпендикулярно до швидкості руху частинки, тому вона не змінює її значення, а це означає, що тангенціальне прискорення дорівнює нулю $a_\tau = 0$, а нормальне прискорення обчислюється за відомою формулою

$$a_N = \frac{v^2}{R} = \frac{v^2 qB}{mv} = \frac{vqB}{m};$$

$$a_N = \frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3}}{1,67 \cdot 10^{-27}} = 1,53 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{і}}{\text{н}^2} \right).$$

Відповідь. 1) сила, яка діє на протон, дорівнює $2,56 \cdot 10^{-19} \text{Н}$; 2) радіус кола, по якому він рухається $1,67 \cdot 10^{-2} \text{м}$; 3) тангенціальне прискорення дорівнює нулю, нормальне $1,53 \cdot 10^8 \text{м/с}^2$.

Аудиторні задачі

1. Електрон, який має енергію 10^3еВ , влітає в однорідне електричне поле з напруженістю 800В/см перпендикулярно до силових ліній поля. Якими мають бути абсолютна величина та напрям вектора індукції магнітного поля, для того щоб електрон рухався прямолінійно? ($4,2 \text{мТл}$)

2. Сила струму в котушці рівномірно збільшується зі швидкістю $0,1 \text{А}$ за 1с . Котушка довжиною $0,5 \text{м}$ і діаметром перерізу $0,1 \text{м}$ має 1000 витків. На котушку щільно надіто кільце з мідного дроту площею перерізу 2мм^2 . Знайти силу струму в кільці, якщо магнітні потоки, які перегинають котушку й кільце, однакові. ($0,74 \text{мА}$)

3. Визначити нормальне і тангенціальне прискорення електрона, що рухається в електричному й магнітному полях, які збігаються за напрямом, якщо швидкість електрона напрямлена вздовж полів. $\left(a_n = 0; a_r = \frac{eE}{m} \right)$

4. У площині з довгим прямим провідником, по якому проходить струм силою 40А , розміщено прямокутну рамку так, що дві більші її сторони довжиною 70см паралельні провіднику, а відстань від провідника до найближчої зі сторін рамки дорівнює її ширині. Знайти магнітний потік, який пронизує рамку. ($3,9 \text{мкВб}$)

2.4. НАВЧАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

2.4.1. Лабораторна робота

Визначення відношення мольних теплоємностей газів

Мета роботи: дослідження адіабатичного процесу та ізопроеесів в ідеальних газах.

Стислі теоретичні відомості

Питома теплоємність c – скалярна величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати одиниці маси газу, щоб збільшити його температуру на 1К .

Мольна теплоємність C – скалярна величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати одному моллю речовини, щоб підвищити його температуру на 1 К.

Мольна й питома теплоємності зв'язані між собою співвідношенням $C = \mu \cdot c$, де μ – молярна маса.

Питома і мольна теплоємності газу залежать від умов, при яких проводиться нагрівання. Наприклад, можна проводити нагрівання при сталому об'ємі ($V = \text{const}$), або при сталому тиску ($P = \text{const}$). При цьому завжди $C_P > C_V$. Формула

$$C_P = C_V + R$$

носить назву *рівняння Майєра*. З цього рівняння випливає, що C_P більша за C_V на величину універсальної газової сталої.

Універсальна газова стала R чисельно дорівнює роботі ізобаричного розширення одного моллю ідеального газу при нагріванні його на один градус; $R = 8,31$ Дж / (моль·К).

Із молекулярно-кінетичної теорії випливає, що C_P і C_V залежать від числа степенів вільності i молекул газу:

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad C_P = \frac{i+2}{2} R.$$

Число степенів вільності молекули газу дорівнює числу незалежних координат, які необхідно задати для визначення положення молекули в просторі. Молекула одноатомного газу має три степені вільності ($i = 3$), жорстка молекула двоатомного газу – п'ять ($i = 5$), триатомного і багатоатомного – шість ($i = 6$).

Відношення теплоємності C_P до C_V для ідеального газу називається показником адіабати. Для ідеального газу

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}$$

Адіабатичним називається процес, який відбувається в системі без теплообміну з оточуючим середовищем.

Закон Пуассона для адіабатичного процесу

$$P V^\gamma = \text{const}$$

формулюється так: для даної маси газу добуток тиску газу на його об'єм, піднесений до степеня γ , є величиною сталою. Закон Пуассона може бути представлено також в змінних P - T або V - T :

$$P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \cdot T = \text{const}, \quad T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}.$$

За допомогою адіабатичного процесу можна розглядати широке коло практичних завдань, коли процеси в газах відбуваються швидко: вивчення протікання газу у турбінах, соплах реактивних двигунів. Значення теплоємності для ізопроесів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Назва процесу	Рівняння процесу	Теплоємність
ізотермічний	$T = \text{const}$ $PV = \text{const}$	$C_T = \pm \infty$
ізохоричний	$V = \text{const}$ $P/T = \text{const}$	$C_V = \frac{i}{2}R$
ізобаричний	$P = \text{const}$ $V/T = \text{const}$	$C_P = \frac{i+2}{2}R.$
адіабатичний	$PV^\gamma = \text{const}$	$C_{ad} = 0$

Метод та експериментальна установка

Експериментальний пристрій (рис. 2.20) складається із скляного балона 1 досить великої ємності, з'єднаного з рідинним U-подібним манометром 2. Верхня частина балона закрита кришкою і обладнана кранами 3 і 4, за допомогою яких балон сполучається з атмосферою і джерелом тиску 5 (у даному випадку гумова груша). Нехай у балоні початково був атмосферний тиск. Якщо швидко збільшити тиск у балоні й закрити кран 4, то кінцева різниця рівнів рідини в манометрі h_1 установиться не одразу (при швидкому стисненні температура газу в балоні підніметься і пройде деякий час, поки температура не зрівняється з температурою в кімнаті).

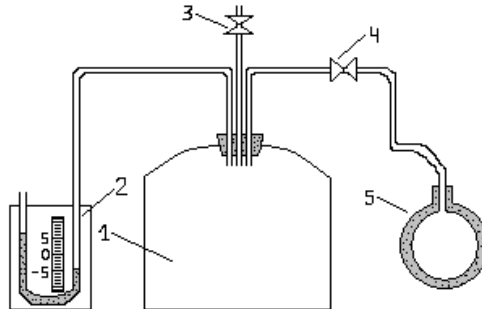


Рис. 2.20

Позначимо температуру оточуючого повітря T_0 , а тиск газу в балоні – P_1 . Цей тиск дорівнює сумі атмосферного тиску P_a і тиску P' , який визначається за показанням манометра :

$$P_1 = P_a + P'.$$

Стан газу, який характеризується параметрами P_1 , T_0 назвемо першим станом газу. Відкриємо кран 3, повітря буде розширюватися поки його тиск не зрівняється з атмосферним і при цьому охолоне до температури T_2 . Параметрами P_a і T_2 буде визначатися другий стан газу. Якщо після встановлення атмосферного тиску в балоні кран 3 швидко закрити, то такий процес можна назвати адіабатичним. Повітря в балоні, яке охолонуло при адіабатичному розширенні, знову почне нагріватися. Цей процес нагрівання – ізохоричний (бо кран закритий), при цьому температура повітря в балоні підвищиться до температури навколишнього середовища T_0 , а тиск зросте до значення P_2 . Це значення дорівнює сумі атмосферного тиску P_a і тиску P'' , якому відповідає різниця рівнів стовпчиків рідини у манометрі h_2 :

$$P_2 = P_a + P''$$

Параметри P_2 і T_0 визначатимуть третій стан газу. Отже ми маємо три стани газу, які характеризуються наступними параметрами:

перший стан - T_0 , $P_a + P'$;

другий стан – T_2 , P_a ; третій стан - T_0 , $P_a + P''$.

Розглядаючи газ як ідеальний, за допомогою рівнянь адіабатичного і ізохоричного процесів запишемо вираз, який зв'яже параметри газу в трьох станах.

Адіабатичний процес (перехід із стану 1 в стан 2)

$$\left(\frac{P_a + P'}{P_a} \right)^{\frac{(1-\gamma)}{\gamma}} = \frac{T_2}{T_0}$$

Ізохоричний процес (перехід із стану 2 в стан 3)

$$\frac{P_a}{(P_a + P'')} = \frac{T_2}{T_0}.$$

Розділивши рівняння адіабатичного процесу на рівняння ізохоричного процесу, та виконавши перетворення, отримаємо:

$$\left(1 + \frac{P''}{P_a}\right) \left(1 + \frac{P'}{P_a}\right)^{(1-\gamma)} = 1.$$

Прологарифмувавши цей вираз, маємо:

$$\ln\left(1 + \frac{P''}{P_a}\right) + \frac{(1-\gamma)}{\gamma} \ln\left(1 + \frac{P'}{P_a}\right) = 0.$$

Оскільки згідно з умовою проведення дослідів,

$$\frac{P'}{P_a} \ll 1, \quad \text{і} \quad \frac{P''}{P_a} \ll 1,$$

то вираз можна спростити, враховуючи, що при умові $x \ll 1$ вираз $\ln(1+x) \approx x$, відповідно

$$\ln\left(1 + \frac{P'}{P_a}\right) = \frac{P'}{P_a}, \quad \ln\left(1 + \frac{P''}{P_a}\right) = \frac{P''}{P_a}.$$

Тоді маємо

$$\frac{P''}{P_a} + \frac{(1-\gamma)P'}{\gamma \cdot P_a} = 0.$$

Виразивши γ із цього рівняння, отримаємо формулу

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''}.$$

Тиск P' у першому стані вимірюється різницею висот стовпців рідини у трубках манометра h_1 , а тиск P'' , що відповідає показанням манометра в третьому стані, вимірюється різницею висот h_2 , тому останній формулі можна надати вигляду

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}.$$

Ця формула є розрахунковою формулою даної роботи.

Порядок виконання роботи

1. Відкрити кран 3 і закрити його, коли рівні рідини в обох колінах манометра установаються на одній висоті.

2. Відкрити кран 4 і обережно нагнати грушею (насосом) повітря в посудину. Коли різниця рівнів в манометрі досягне 150...200 мм, закрити кран 4.

3. Почекати 3...5 хв., поки перестануть змінюватися рівні рідини в манометрі і виміряти різницю рівнів h_1 .

4. Відкрити кран 3 і знову швидко закрити його в момент, коли рівні рідини в манометрі зрівняються.

5. Почекати 3...5 хв., поки встановиться різниця рівнів рідини в манометрі h_2 і виміряти її

6. Дослід повторити не менше 8...10 разів.

7. Результати вимірів занести у табл. 2.2.

8. Для кожного вимірювання (зняття показників) необхідно знайти відповідне значення γ_i , а потім розрахувати середнє значення $\langle \gamma \rangle$ і $\Delta \gamma_i$. Отримані дані слід обробляти як результати прямих вимірювань (табл. 2.2), t_c – коефіцієнт Стьюдента, $S_{n\gamma}$ – середня квадратична похибка для $\langle \gamma \rangle$.

9. Кінцевий результат записати у вигляді: $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta \gamma$.

Таблиця 2.2

Номер досліду	h_1	h_2	$\gamma_i = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma_i = \gamma_i - \bar{\gamma}$	$\Delta \gamma = t_c \cdot S_{n\gamma}$
1						
2						
...						
8						

Запитання для самоперевірки

1. Дайте означення питомої та молярної теплоємностей.
2. Запишіть рівняння стану ідеального газу для одного моля газу та для довільної маси газу.
3. Сформулюйте та запишіть перший закон термодинаміки.
4. Запишіть рівняння ізопроцесів та застосуйте до них перший закон термодинаміки.
5. Виведіть рівняння Майера.
6. Поясніть, чому величина C_p завжди більше C_v .
7. Що називається універсальною газовою сталою? Який її фізичний зміст?

8. Що називається числом степенів вільності молекули ідеального газу?

9. Запишіть формули для теплоємностей C_p та C_v відповідно до молекулярно-кінетичної теорії.

10. Який процес називається адіабатичним, та як записується рівняння адіабати для ідеального газу в змінних $P-V$ та $P-T$?

11. Як залежить γ від числа степенів вільності молекул газу?

12. Які термодинамічні процеси спостерігаються при визначенні відношення теплоємностей у даній лабораторній роботі?

13. Як впливає на результат вимірювання запізнення при закриванні крана 3 (рис. 2.20)?

14. Чому при адіабатичному стисненні газ нагрівається, а при розширенні охолоджується?

15. Виведіть формулу для розрахунку показника адіабати γ .

2.4.2. Лабораторна робота Вимірювання електричних величин

Мета роботи: ознайомлення з електровимірювальними приладами, експериментальне визначення опору провідника за допомогою амперметра та вольтметра.

Теоретичні відомості

Прилади для вимірювання сили струму в електричному колі називаються *амперметрами*. Амперметри вмикають послідовно зі споживачем електричної енергії (рис. 2.21). Вони повинні мати якомога менший опір, щоб їх увімкнення не змінювало сили струму в колі.

Прилади, які використовуються для вимірювання напруги (різниці потенціалів), називаються *вольтметрами*. Вольтметри підмикають паралельно до тієї ділянки кола, між крайніми точками якої потрібно виміряти різницю потенціалів (рис. 2.21). Опір вольтметра має перевищувати опір цієї ділянки.

Максимальне значення величини, яке може виміряти прилад, називається *межею вимірювання*, або *номінальним значенням приладу*. Ціна поділки C визначається відношенням номінального значення X_{\max} до загальної кількості N поділок на шкалі приладу:

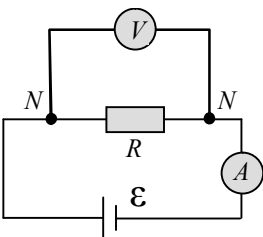


Рис. 2.21

$$C = \frac{X_{\max}}{N}.$$

Значення ціни поділки приладу необхідне для визначення виміряного значення x шуканої величини за формулою:

$$x = Cn,$$

де n — кількість поділок, на які відхилилася стрілка при вимірюванні.

Клас точності ε_k , визначається відношенням інструментальної абсолютної похибки Δx приладу до його межі вимірювання і виражається у відсотках:

$$\varepsilon_{\varepsilon} = \frac{\Delta x}{X_{\max}} \cdot 100.$$

Знаючи клас точності, завжди можна визначити максимальну похибку приладу:

$$\Delta x = \frac{\varepsilon_{\varepsilon} X_{\max}}{100}.$$

Якщо необхідно виміряти силу струму або напругу, які перевищують межу вимірювання приладу, використовують шунти й додаткові опори.

Шунт умикають паралельно амперметру, унаслідок чого через амперметр пройде лише частина вимірюваного струму (рис. 2.22). Опір шунта дорівнює:

$$R_o = \frac{R_A}{m-1},$$

де R_o та R_A — опори шунта та амперметра; m — коефіцієнт розширення межі вимірювання, який визначається відношенням струму в ланцюгу до струму, що протікає через амперметр:

$$m = \frac{I}{I_A}.$$

Для розширення межі вимірювання вольтметра використовують додатковий опір, який вмикається послідовно з вольтметром (рис. 2.23). Додатковий опір

$$R_d = R_V(m-1),$$

де R_V — опір вольтметра; m — коефіцієнт розширення межі вимірювання, який визначається відношенням повної напруги до напруги вольтметра:

$$m = \frac{U}{U_V}.$$

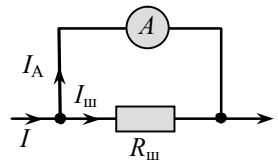


Рис. 2.22

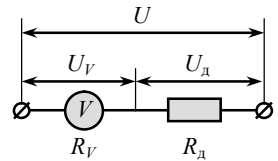


Рис. 2.23

При розширенні межі вимірювання приладу зростає відповідно ціна його поділки.

Використовуючи закон Ома для ділянки кола, що містить амперметр і вольтметр, можна визначити невідомий опір:

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

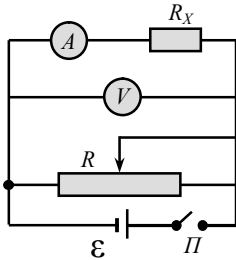


Рис. 2.24

У цій роботі для визначення опору використовується схема, зображена на рис. 2.24. Вона включає в себе джерело постійного струму ε , реостат R , амперметр, вольтметр та опір. Реостат умикається за схемою подільника напруги й призначається для вимірювання струму в колі.

Амперметр вимірює силу струму, який протікає через опір R_x , а вольтметр вимірює силу напруги на невідомому опорі та опір амперметра. Згідно з законом Ома маємо:

$$U = I(R_x + R_A), \quad \text{звідки} \quad R_x = \frac{U}{I} - R_A.$$

Порядок виконання роботи та обробка результатів вимірювання

1. Ознайомитися з приладами та занести відповідні дані до табл. 2.3 і 2.4.
2. Обчислити ціну поділки та інструментальну похибку для всіх меж вимірювання, вказаних на приладах. Здобуті результати занести до табл. 2.3 і 2.4.
3. Зібрати електричне коло за схемою, зображеною на рис. 2.24. Переміщуючи повзунок реостата, провести вимірювання струму та напруги в такому порядку.
 - 3.1. Стрілки приладів перебувають у першій третині їхніх шкал.
 - 3.2. Стрілки приладів перебувають у середній частині шкал.
 - 3.3. Стрілки приладів перебувають в останній третині шкал.
 - 3.4. При кожному вимірюванні покази приладів (кількість поділок) вносити до табл. 2.5.
4. Обчислити значення струму, напруги й опору R_x . При потребі скористатися даними табл. 2.3 і 2.4.
5. Для кожного досліду обчислити відносні похибки прямих вимірювань струму та напруги, а також відносну й абсолютну

похибки опосередкованого вимірювання опору. Результати занести до табл. 2.5. Проаналізувати, в якому разі похибки найменші.

Таблиця 2.3

Амперметр	Діапазон вимірювання I_{\max}, A	Кількість поділок N	Ціна поділки C, A	Клас точності $\epsilon_k, \%$	Абсолютна похибка $\Delta I, A$	Опір амперметра $R_A, \text{Ом}$

Таблиця 2.4

Вольтметр	Діапазон вимірювання U_{\max}, B	Кількість поділок N	Ціна поділки C, B	Клас точності $\epsilon_k, \%$	Абсолютна похибка $\Delta U, B$	Опір вольтметра $R_V, \text{Ом}$

Таблиця 2.5

№	Напруга U		Струм I		Відносна похибка $\frac{\Delta U}{U}, \%$	Відносна похибка $\frac{\Delta I}{I}, \%$	Опір $R_X, \text{Ом}$	Відносна похибка $\frac{\Delta R_X}{R_X}$	Абсолютна похибка $\Delta R_X, \text{Ом}$
	под.	B	под.	A					
1									
2									
3									

Контрольні запитання

1. Як визначається ціна поділки шкали приладу?
2. Що таке клас точності?
3. Як визначити абсолютну інструментальну похибка приладу?
4. Описати застосування шунта та послідовного резистора.
5. Накреслити електричну схему експерименту та вивести вираз для визначення опору.

2.5. НАВЧАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ ІНДИВІДУАЛЬНІ ДОМАШНІ ЗАВДАННЯ

2.5.1. Варіанти ІДЗ

Індивідуальне домашнє завдання (ІДЗ) виконується в окремому зошиті. Варіанти ІДЗ відповідно до номера студента у списку навчальної групи наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Номер варіанта	Номери задач домашньої роботи				
1	1.1	2.1	2.26	2.40	3.21
2	1.2	2.2	2.27	2.31	3.22
3	1.3	2.3	2.28	2.32	3.23
4	1.4	2.4	2.29	2.33	3.24
5	1.5	2.5	2.30	2.34	3.25
6	1.6	2.6	2.60	3.1	3.26
7	1.7	2.7	2.59	3.2	3.27
8	1.8	2.8	2.58	3.3	3.28
9	1.9	2.9	2.57	3.4	3.29
10	1.10	2.10	2.56	3.5	3.30
11	1.11	2.11	2.55	3.6	3.31
12	1.12	2.12	2.54	3.7	3.32
13	1.13	2.13	2.53	3.8	3.33
14	1.14	2.14	2.52	3.9	3.34
15	1.15	2.15	2.51	3.10	3.1
16	1.16	2.16	2.50	3.11	3.2
17	1.17	2.17	2.49	3.12	3.3
18	1.18	2.18	2.48	3.13	3.4
19	1.19	2.19	2.47	3.14	3.5
20	1.20	2.20	2.46	3.15	3.6
21	1.21	2.21	2.45	3.16	3.7
22	1.22	2.22	2.44	3.17	3.8
23	1.23	2.23	2.43	3.18	3.9
24	1.24	2.24	2.42	3.19	3.10
25	1.25	2.25	2.41	3.20	3.11

2.5.2. Задачі для індивідуального домашнього завдання

1-1. У балоні місткістю 3 л міститься кисень масою 4 г. Визначити кількість речовини ν газу і концентрацію його молекул.

1-2. У посудині місткістю 2,24 л за нормальних умов міститься кисень. Визначити кількість речовини ν і масу кисню, а також концентрацію його молекул у посудині.

1-3. Визначити концентрацію молекул ідеального газу за температури 300 К і тиску 1 МПа.

1-4. Скільки молекул газу міститься в балоні ємністю 30 л за температури 300 К і тиску 5 МПа?

1-5. Скільки молекул міститься в посудині місткістю 480 см³ за температури 20 °С, якщо тиск газу становить $2,5 \cdot 10^6$ Па?

1-6. Знайти тиск газу, якщо в 1 см³ міститься 1020 молекул, а температура газу 87 °С.

1-7. Середня кінетична енергія молекули газу за температури 500 °С дорівнює $1,6 \cdot 10^{-20}$ Дж. Знайти енергію молекули даного газу за температури -273 та 1000 °С.

1-8. Знайти температуру газу, якщо середня енергія поступального руху його молекул дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

1-9. У колбі місткістю 240 см³ перебуває газ за температури 290 К і тиску 50 кПа. Визначити кількість речовини і кількість його молекул.

1-10. Тиск газу дорівнює 1 МПа, концентрація його молекул дорівнює 1020 см⁻³. Визначити температуру газу і середню кінетичну енергію поступального руху молекул газу.

1-11. Визначити середні значення повної кінетичної енергії однієї молекули кисню та водяної пари за температури 400 К.

1-12. За температури 15 °С газ має тиск 133 кПа і займає об'єм 2 л. Газ стиснули до об'єму 1,5 л і температуру підвищили до 30 °С. Знайти кінцевий тиск газу.

1-13. Приміщення має об'єм 50 м³. Взимку температура в ньому 0 °С, а влітку 40 °С. Наскільки відрізняється маса повітря в приміщенні влітку і взимку? Молярна маса повітря 29 г/моль.

1-14. Газ у посудині перебуває під тиском 200 кПа за температури 127 °С. Знайти тиск у посудині після того, як половину маси газу випустили, а температура знизилась на 50 °С.

1-15. Знайти тиск 2,2 кг вуглекислого газу CO₂, що перебуває в балоні місткістю 0,5 м³ за температури 37 °С.

1-16. У колбі місткістю 0,5 л міститься 0,1 г водню. Визначити його тиск. Температура навколишнього середовища 17 °С.

1-17. Скільки молів газу перебуває в балоні місткістю 20 л за тиску 10 атм та температури 10 °С?

1-18. Знайти масу 20 л вуглекислого газу CO₂ за температури 27 °С та тиску 1 атм.

1-19. Сталевий балон місткістю 25 л наповнений ацетиленом C₂H₂ за температури 27 °С до тиску 200 атм. Частину ацетилену було використано для автогенного зварювання. Яку масу ацетилену використано, якщо тиск у балоні при –23 °С знизився до 40 атм?

1-20. Балон містить у собі стиснений газ за температури 27 °С та тиску 40 атм. Який буде тиск, якщо з балона буде випущено половину маси газу, а температура знизиться до 12 °С?

1-21. У балоні місткістю 4 л міститься 2 г водню та 5 г азоту. Визначити тиск газової суміші в балоні, якщо її температура 27 °С.

1-22. У балоні міститься 14 г азоту і 9 г водню за температури 10 °С і тиску 1 МПа. Визначити молярну масу суміші і об'єм балона.

1-23. У балоні об'ємом 1 м³ міститься 1,6 кг кисню і 0,9 кг води. Визначити тиск у балоні за температури 500 °С, якщо відомо, що за цієї температури вода повністю перетворюється в пару.

1-24. Визначити масу кисню, що міститься в балоні місткістю 10 л, якщо його температура 18 °С, а манометр, сполучений із балоном, показує тиск 90 атм.

1-25. Тиск ртутної пари за 60 °С дорівнює 0,015 мм рт.ст. Обчислити густину ртутної пари за цієї температури.

2-1. Визначити питомі теплоємності c_p та c_v газів: гелію; водню; вуглекислого газу.

2-2. Різниця питомих теплоємностей $c_p - c_v$ деякого двоатомного газу дорівнює 260 Дж/(кг · К). Знайти молярну масу газу і його питомі теплоємності.

2-3. Визначити питому теплоємність за сталого об'єму суміші, яка складається з 5 л водню і 3 л гелію.

2-4. Молярна маса деякого газу дорівнює 0,03 кг/моль, відношення $c_p / c_v = 1,4$. Знайти питомі теплоємності c_p і c_v цього газу.

2-5. Водень масою 10 г нагріли на $\Delta T = 200$ К, при цьому було передано 40 кДж теплоти. Знайти зміну внутрішньої енергії водню і здійснену роботу.

2-6. Маса азоту 10,5 г ізотермічно розширюється при температурі –23 °С так, що його тиск змінюється від 250 до 100 кПа. Обчислити роботу, яка виконується газом при розширенні.

2-7. Під час ізотермічного розширення газу, який займав початковий об'єм 2 м^3 , тиск його змінюється від $0,5$ до $0,4 \text{ МПа}$. Обчислити роботу, яка виконується газом при розширенні.

2-8. Маса вуглекислого газу 7 г була нагріта на 10 К в умовах вільного розширення. Знайти роботу розширення газу та зміну його внутрішньої енергії.

2-9. У закритому балоні міститься 20 г азоту і 32 г кисню. Визначити зміну внутрішньої енергії суміші газів при охолодженні її на 28 К .

2-10. Один кіломоляр азоту перебуває за нормальних умов. При адіабатичному розширенні газу його об'єм збільшився у п'ять разів. Визначити зміну внутрішньої енергії і роботу, яка здійснюється газом при розширенні.

2-11. Яка робота здійснюється при ізотермічному розширенні водню масою 5 г , за температури 290 К , якщо об'єм газу збільшується втричі?

2-12. Балон об'ємом 20 л містить водень за температури 300 К під тиском $0,4 \text{ МПа}$. Які будуть значення температури та тиску, якщо газу надати кількість теплоти 6 кДж ?

2-13. Азот масою 5 кг , нагрітий на $\Delta T = 150 \text{ К}$, зберіг незмінний об'єм. Знайти: кількість теплоти, яка передана газу; зміну внутрішньої енергії; роботу, виконану газом.

2-14. Під час нагрівання кисню в об'ємі 1 л тиск газу змінився на $\Delta p = 0,5 \text{ МПа}$. Знайти кількість теплоти, переданої газу.

2-15. Азот масою 200 г розширюється ізотермічно за температури 280 К , його об'єм збільшується в два рази. Визначити: зміну внутрішньої енергії газу; роботу розширення газу; кількість теплоти, яку отримав газ.

2-16. Обчислити внутрішню енергію одного кіломоля вуглекислого газу за температури $77 \text{ }^\circ\text{C}$.

2-17. Обчислити внутрішню енергію 8 г кисню за температури 300 К .

2-18. Яка енергія необхідна для нагрівання 20 г ртутної пари від 400 до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ за сталого об'єму?

2-19. Яка кількість теплоти необхідна для нагрівання 2 молів кисню на 100 К за сталого тиску?

2-20. Обчислити питомі теплоємності гелію, азоту та вуглекислого газу за сталого об'єму.

2-21. Обчислити питомі теплоємності гелію, азоту та вуглекислого газу за сталого тиску.

2-22. Балон з киснем місткістю 10 л , тиск у якому $78 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ і температура $7 \text{ }^\circ\text{C}$, нагрівається до $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Яку кількість теплоти поглинає газ?

2-23. Азот масою 0,2 кг нагрівається за сталого тиску від 20 до 100 °С. Яку кількість теплоти отримує газ? Який приріст внутрішньої енергії газу? Яку зовнішню роботу виконує газ?

2-24. Початковий тиск газу 120 атм, об'єм 1 л. Знайти тиск газу, якщо його об'єм набуватиме значень 2 л, 3 л, 4 л, 5 л, а процес розширення газу ізотермічний.

2-25. Яка кількість теплоти виділиться, якщо азот масою 1 г за температури 280 К і під тиском 0,1 МПа ізотермічно стиснути до тиску 1 МПа?

2-26. Гелій масою 1 г був нагрітий на $\Delta T = 100$ К за постійного тиску. Обчислити: 1) кількість теплоти для нагрівання газу; 2) роботу розширення газу; 3) приріст внутрішньої енергії газу.

2-27. 10 л газу, що перебуває під тиском 100 кПа, нагрівають від 300 до 400 К. Обчислити роботу при ізобарному розширенні газу.

2-28. Яка кількість теплоти виділяється при ізотермічному стисненні 1 г азоту від 0,1 до 1 МПа за температури 280 К?

2-29. При адіабатичному стисненні газу його об'єм зменшився в 10 разів, а тиск збільшився в 21,4 раза. Визначити відношення C_p/C_v теплоємностей газу.

2-30. Визначити роботу адіабатичного розширення водню масою 4 г, якщо температура газу зменшилася на 10 К.

2-31. Яка кількість теплоти виділяється при ізотермічному стисненні 3 л повітря до об'єму 0,5 л, якщо його початковий тиск дорівнює 760 мм рт. ст.?

2-32. 1 кг повітря, взятого за температури 20 °С, стискають так, що його тиск зростає від 9,8 до 98 Н/м². Обчислити роботу в разі ізотермічного та адіабатичного стиснення.

2-33. Як зміниться внутрішня енергія 100 г кисню при його нагріванні від 10 до 60 °С?

2-34. Як зміниться внутрішня енергія азоту, взятого за нормальних умов в об'ємі 10 л, якщо його об'єм збільшиться до 12 л ізобарично та якщо цей процес буде проходити адіабатично?

2-35. У циліндрі міститься повітря за температури 40 °С. Визначити масу повітря, якщо при ізобарному нагріванні до 100 °С газ виконує роботу 40 кДж.

2-36. 10 л газу, що перебуває під тиском 2 атм, розширилося до об'єму 28 л. Обчислити роботу газу у випадку: а) ізобарного розширення; б) ізотермічного розширення.

2-37. Визначити початковий об'єм азоту, що міститься в циліндрі під тиском 12 атм, якщо при ізобарному нагріванні від 100 до 500 °С газ виконав роботу $9,8 \cdot 10^4$ Дж.

2-38. Визначити роботу адіабатичного стиснення 1 кг повітря від тиску 1 до 10 атм, якщо його початкова температура була 7 °С.

2-39. При адіабатичному стисненні кисню масою 1 кг була виконана робота 100 кДж. Визначити кінцеву температуру газу, якщо до стиснення кисню температура була 300 К.

2-40. Газ займав об'єм 12 л за тиску 100 кПа і був ізобарно нагрітий від температури 300 К до температури 400 К. Визначити роботу розширення газу.

2-41. Яка робота здійснюється при ізотермічному розширенні водню масою 5 г, який перебуває за температури 290 К, якщо об'єм газу збільшується утричі?

2-42. Водень ізобарно нагріли, при цьому газу було передано 40 кДж теплоти. Визначити зміну внутрішньої енергії газу і здійснену ним роботу.

2-43. При ізотермічному розширенні водню масою 1 г за температури 280 К, об'єм газу збільшився утричі. Визначити роботу розширення газу.

2-44. Під час колового процесу газ виконав роботу 1 Дж та передав холодильнику 4,2 Дж тепла. Який ККД циклу?

2-45. Газ одержав від нагрівника 4 кДж тепла. Яку роботу виконав газ, якщо ККД циклу 0,1?

2-46. Ідеальна теплова машина працює за циклом Карно і виконує за один цикл роботу 2,94 кДж та віддає за один цикл холодильнику 13,4 кДж теплоти. Знайти ККД циклу.

2-47. Ідеальна теплова машина працює за циклом Карно. При цьому 80 % теплоти, яку отримує машина від нагрівача, передається холодильнику. Машина отримує від нагрівача 6,28 кДж теплоти. Знайти ККД циклу та роботу, яку виконує машина за один цикл.

2-48. Ідеальний газ здійснює цикл Карно. Температура нагрівача в три рази більша від температури холодильника. Нагрівач віддав газу 42 кДж теплоти. Яку роботу виконав газ?

2-49. Ідеальний газ здійснює цикл Карно. Температура нагрівача дорівнює 470 К, температура холодильника дорівнює 280 К. Газ виконує роботу 100 Дж. Визначити ККД циклу, а також кількість теплоти, яку газ віддає холодильнику.

2-50. Якою повинна бути температура холодильника ідеальної парової машини, якщо за температури пари 200 °С її ККД машини дорівнює 21,1 %?

2-51. Температура пари у котлі 200 °С, а температура холодильника 100 °С. Знайти ККД теплової машини, вважаючи її ідеальною. Які існують засоби підвищення ККД реальної теплової машини?

2-52. Газ отримав від нагрівача 300 Дж теплоти. Яку роботу виконав газ, якщо ККД циклу 0,4? Скільки теплоти газ віддав холодильнику?

2-53. Під час колового процесу газ виконав роботу 50 Дж та віддав холодильнику 200 Дж тепла. Який ККД циклу?

2-54. Ідеальний газ здійснює цикл Карно. Температура холодильника дорівнює 290 К. У скільки разів збільшиться ККД циклу, якщо температура нагрівача підвищиться від 400 до 600 К?

2-55. Газ здійснює цикл Карно і віддає теплоту 14 кДж холодильнику. Визначити температуру нагрівача, якщо за температури холодильника 280 К робота циклу Карно дорівнює 6 кДж.

2-56. Газ, здійснює цикл Карно і віддає холодильнику 67 % теплоти, яку отримав від нагрівача. Визначити температуру холодильника, якщо температура нагрівача 430 К.

2-57. У циклі Карно газ отримав від нагрівача теплоту 500 Дж і здійснив роботу 100 Дж. Температура нагрівача 400 К. Визначити температуру холодильника.

2-58. Газ, який здійснює цикл Карно, отримав 84 кДж теплоти. Визначити роботу газу, якщо температура нагрівача утричі більша від температури холодильника.

2-59. Газ отримав від нагрівача 4,38 кДж і здійснив роботу 2,4 кДж. Визначити температуру нагрівача, якщо температура холодильника 273 К.

2-60. Якою повинна бути температура пари ідеальної парової машини, якщо за температури холодильника 373 К її ККД дорівнює 21,1 %?

3.1. Дві однакові електропровідні кулі містяться на відстані 60 см одна від одної. Сила відштовхування F_1 між ними дорівнює 70 мкН. Після того як кулі доторкнулися одна до одної і знову віддалилися на ту саму відстань, сила відштовхування зросла до $F_2 = 160$ мкН. Знайти заряди q_1 і q_2 , які були на кулях до взаємодії. Діаметр куль вважати набагато меншим за відстань між ними.

3.2. На відстані $d = 5$ см один від одного містяться два точкові заряди $q_1 = 100$ нКл і $q_2 = -500$ нКл. Визначити силу, з якою ці заряди діють на точковий заряд $q = 10$ нКл, що міститься на відстані $r_1 = 3$ см від першого і $r_2 = 4$ см від другого зарядів. Навколишнє середовище — повітря.

3.3. Три однойменні заряди по 5 нКл кожний розміщено у вершинах рівностороннього трикутника із стороною $l = 1$ см. Визначити силу, яка діє на кожний заряд.

3.4. Два позитивні точкові заряди q і $4q$ закріплено на відстані $l = 60$ см один від одного. Визначити, в якій точці на прямій, що проходить через заряди, потрібно помістити третій заряд q_1 , щоб він перебував у рівновазі. Вказати, який знак повинен мати цей заряд для того, аби рівновага була стійкою, якщо переміщення заряду можливе тільки вздовж прямої, яка проходить через закріплені заряди.

3.5. Електрон, що рухається горизонтально зі швидкістю $v_x = 10^8$ м/с, влетів в однорідне поле конденсатора паралельно його пластинам. Якою буде за абсолютною величиною і напрямом швидкість електрона, якщо напруженість поля 9 кВ/м, а довжина пластин конденсатора $l = 10$ см.

3.6. У центр квадрата, у кожній вершині якого міститься заряд $q = 2,33$ нКл, поміщено від'ємний заряд q_0 . Знайти цей заряд, якщо на кожний заряд q діє результуюча сила, яка дорівнює нулю.

3.7. У вершинах правильного шестикутника розміщено три позитивні і три негативні заряди. Знайти напруженість поля в центрі шестикутника за різних варіантів розміщення зарядів. Кожний заряд $q = 1,5$ нКл, сторона шестикутника $a = 3$ см.

3.8. Дві кульки із зарядами $q_1 = q_2 = 20$ мкКл містяться на відстані 80 см одна від одної. Яку роботу потрібно виконати, щоб наблизити їх до відстані 40 см?

3.9. Кулька масою 1 г і зарядом 10^{-8} Кл переміщується з точки A , потенціал якої дорівнює 600 В, у точку B , потенціал якої дорівнює нулю. Якою була її швидкість у точці A , якщо в точці B вона стала такою, що дорівнює 30 м/с?

3.10. Яку мінімальну швидкість повинен мати протон, щоб він міг досягнути поверхні металевої кулі, зарядженої до потенціалу $\varphi = 400$ В?

3.11. До якої найменшої відстані можуть наблизитися два електрони, що рухаються назустріч один одному, з відносною швидкістю 10^6 м/с.

3.12. Сила струму в провіднику рівномірно зростає від $I_0 = 0$ до $I = 3$ А протягом 10 с. Визначити заряд, що пройшов за цей час через провідник.

3.13. Чому дорівнює сила і густина струму в провіднику діаметром перерізу $1,2$ мм², коли за $0,4$ с через провідник пройшло $6 \cdot 10^{18}$ електронів?

3.14. Визначити, скільки часу потрібно для переміщення вільного електрона в провіднику довжиною $l = 10$ см від одного кінця до

другого, якщо густина струму $j = 1 \text{ А/мм}^2$, а в кожному кубічному сантиметрі $n = 2,5 \cdot 10^{22}$ вільних електронів.

3.15. По двох паралельно з'єднаних провідниках (мідному й алюмінієвому) протікає електричний струм. Алюмінієвий провідник удвічі товщий і вдвічі довший за мідний. У скільки разів густина струму в мідному провіднику більша, ніж в алюмінієвому? Питомий опір алюмінію $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, міді — $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3.16. Якої довжини треба взяти мідний провідник для виготовлення двопроводової лінії, по якій проходить струм силою $I = 20 \text{ А}$? Напруга на шинах електростанції дорівнює $U = 2,4 \text{ кВ}$, а її втрати не повинні перевищувати 6 %. Площа поперечного перерізу провідника становить $S = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

3.17. Електричний струм передається на відстань $l = 600 \text{ м}$ по двопроводовій лінії з мідних провідників площею поперечного перерізу $S = 10 \text{ мм}^2$. Напруга на початку лінії $U_0 = 240 \text{ В}$, сила струму в лінії $I = 18 \text{ А}$. Знайти напругу на кінці лінії і втрати напруги у процентах від номінальної напруги $U_N = 220 \text{ В}$.

3.18. Знайти невідомий опір провідника за показаннями амперметра і вольтметра, якщо $U = 1 \text{ В}$, $I = 5 \text{ мА}$. Внутрішній опір вольтметра $R_V = 600 \text{ Ом}$.

3.19. Електричну лампу опором $R = 240 \text{ Ом}$, розраховану на напругу $U_N = 120 \text{ В}$, потрібно живити від мережі напругою $U = 220 \text{ В}$. Провідник якої довжини потрібно з'єднати послідовно з лампою? Площа поперечного перерізу провідника $S = 0,55 \text{ мм}^2$, питомий опір провідника $\rho = 110 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3.20. До джерела струму, внутрішній опір якого $r = 2 \text{ Ом}$, паралельно прислали дві лампочки, кожна з яких має опір $R = 8 \text{ Ом}$. Амперметр у нерозгалуженій частині кола показує $I = 2 \text{ А}$. Що покаже цей амперметр, коли одна з лампочок перегорить?

3.21. Елемент $E = 2 \text{ В}$ має внутрішній опір $r = 0,5 \text{ Ом}$. Знайти спад напруги всередині елемента для сили струму в колі $0,25 \text{ А}$, і внутрішній опір кола?

3.22. Джерело струму замкнено на зовнішній опір R , ККД джерела $\eta = 50 \%$. У скільки разів зміниться ККД джерела струму, якщо зовнішній опір збільшиться в 4 рази?

3.23. Елемент з ЕРС $E = 2 \text{ В}$ і внутрішнім опором $r = 0,5 \text{ Ом}$ увімкнено в коло послідовно з амперметром, який показує силу струму $I = 0,8 \text{ А}$. З яким ККД працює елемент?

3.24. ККД елемента $\eta = 30 \%$ при силі струму $I = 2 \text{ А}$. Чому дорівнює ЕРС елемента, якщо його внутрішній опір $r = 0,4 \text{ Ом}$?

3.25. Елемент, ЕРС якого E і внутрішній опір r , замкнено на зовнішній опір R . Найбільша потужність у зовнішньому колі

дорівнює $P = 9$ Вт. Сила струму за цих умов у колі дорівнює $I = 3$ А. Знайти значення E і r .

3.26. ЕРС батареї $E = 240$ В, внутрішній опір $r = 1$ Ом. Визначити повну і корисну потужність батареї та її коефіцієнт корисної дії, якщо зовнішній опір кола $R = 23$ Ом.

3.27. Електрон рухається в магнітному полі з індукцією $0,06$ Тл по дузі кола радіуса $0,5$ см. Визначити кінетичну енергію електрона (у джоулях і електрон-вольтах).

3.28. Електрон рухається в магнітному полі по колу радіуса 2 см. Індукція поля $0,1$ Тл. Визначити кінетичну енергію електрона, узявши до уваги зміну маси частинки залежно від її швидкості.

3.29. Заряджена частинка, яка має швидкість $2 \cdot 10^6$ м/с, влетіла в однорідне магнітне поле з індукцією $0,26$ Тл. Знайти відношення заряду частинки до її маси, якщо частинка описала в полі дугу кола радіуса 8 см. За цим відношенням визначити, яка це частинка.

3.30. Визначити швидкість і кінетичну енергію α -частинок, які вилітають із циклотрона, якщо, підлітаючи до вихідного вікна, вони рухаються по колу радіуса $1,5$ м. Індукція магнітного поля $1,2$ Тл.

3.31. Електрон влітає в однорідне магнітне поле напруженістю 16 кА/м зі швидкістю 8 Мм/с. Вектор швидкості утворює кут 60° з напрямом лінії індукції. Визначити радіус і крок гвинтової лінії, по якій буде рухатись електрон у магнітному полі. Визначити також крок гвинтової лінії для електрона, який летить під малим кутом до лінії індукції.

3.32. В однорідному магнітному полі з індукцією 150 мТл рухається електрон по гвинтовій лінії. Визначити швидкість електрона, якщо крок гвинтової лінії становить 25 см, а радіус 10 см.

3.33. Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 7 мТл по гвинтовій лінії, радіус якої 1 см і крок $24,19$ см. Визначити період обертання електрона і його швидкість.

3.34. Електрон рухається в магнітному полі, індукція якого 3 мТл, по гвинтовій лінії, радіус якої 3 см і крок 6 см. Визначити швидкість електрона.

2.5.3. Відповіді до задач

1-1. ($0,125$ моль; $2,51 \cdot 10^{25}$ м⁻³). **1-2.** ($0,1$ моль; $3,2$ г; $2,68 \cdot 10^{25}$ м⁻³). **1-3.** ($2,4 \cdot 10^{26}$ м⁻³). **1-4.** ($3,6 \cdot 10^{24}$). **1-5.** ($3 \cdot 10^{24}$). **1-6.** ($5 \cdot 10^5$ Па). **1-7.** (0 ; $2,6 \cdot 10^{-20}$ Дж). **1-8.** (7700 К). **1-9.** ($4,97 \cdot 10^{-3}$ моль; $2,99 \cdot 10^{21}$). **1-10.** (725 К; $1,5 \cdot 10^{-20}$ Дж). **1-11.** ($13,8 \cdot 10^{-21}$ Дж; $16,6 \cdot 10^{-21}$ Дж). **1-12.** (186 кПа). **1-13.** ($8,7$ кг). **1-14.** ($8,8 \cdot 10^4$ Па). **1-15.** ($2,6 \cdot 10^5$ Н/м²). **1-16.** ($2,4 \cdot 10^6$ Н/м²). **1-17.** ($8,5$ моль). **1-18.** ($35 \cdot 10^{-3}$ кг). **1-19.** ($3,9$ кг). **1-20.** (19 атм). **1-21.** ($7,35 \cdot 10^5$ Н/м²). **1-22.** ($46 \cdot 10^{-4}$ кг/моль; $11,7$ л). **1-23.** (640 кПа). **1-24.** ($1,2$ кг). **1-25.** ($1,4 \cdot 10^{-4}$ кг/м³).

2-1. (3,12 кДж/(кг · К) та 5,19 кДж/(кг · К); 10,4 кДж/(кг · К) та 14,6 кДж/(кг · К); 567 Дж/(кг · К) та 756 Дж/(кг · К). **2-2.** (0,032 кг/моль; 650 Дж/(кг · К); 910 Дж/(кг · К)). **2-3.** (4,53 кДж/(кг · К)). **2-4.** (693 Дж/(кг · К); 970 Дж/(кг · К)). **2-5.** (20,8 кДж; 19,2 кДж). **2-6.** (714 Дж). **2-7.** (223 кДж). **2-8.** (13,2 Дж; 39,6 Дж). **2-9.** (1 кДж). **2-10.** (2,69 МДж). **2-11.** (6,62 кДж). **2-12.** (390 К; 520 кПа).
2-13. (7,75 МДж; 7,75 МДж; 0). **2-14.** (1,75 кДж). **2-15.** (0; 11,6 кДж; 11,6 кДж).
2-16. (8,736 кДж/моль). **2-17.** (1,56 кДж). **2-18.** (125 Дж). **2-19.** (5824 Дж).
2-20. (3120 Дж/(кг · К); 743 Дж/(кг · К); 567 Дж/(кг · К)). **2-21.** (5200 Дж/(кг · К); 1040 Дж/(кг · К); 756 Дж/(кг · К)). **2-22.** (6 кДж). **2-23.** (16,64 кДж; 11,885 кДж; 4,755 кДж). **2-24.** (60 атм; 40 атм; 30 атм; 24 атм). **2-25.** (101 Дж). **2-26.** (1) 520 Дж; 2) 208 Дж; 3) 312 Дж). **2-27.** (3300 Дж). **2-28.** (191 Дж). **2-29.** (1,33). **2-30.** (416 Дж).
2-31. (545 Дж). **2-32.** (194 кДж; 196 кДж). **2-33.** (3,9 кДж). **2-34.** (500 Дж; -300 Дж).
2-35. (2,3 кг). **2-36.** (3600 Дж; 2100 кДж). **2-37.** ($77 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$). **2-38.** (90 кДж).
2-39. (454 К). **2-40.** (400 Дж). **2-41.** (6,62 кДж). **2-42.** (28,6 кДж; 11,4 кДж).
2-43. (1,3 кДж). **2-44.** (0,193). **2-45.** (400 Дж). **2-46.** (0,18). **2-47.** (0,2; 1,26 кДж).
2-48. (28 кДж). **2-49.** (0,404; 59,6 Дж). **2-50.** (373 К). **2-51.** (21%). **2-52.** (120 Дж; 180 Дж). **2-53.** (20 %). 4-54 (1,88). **2-55.** (400 К). **2-56.** (288 К). **2-57.** (320 К).
2-58. (56 кДж). **2-59.** (606 К). **2-60.** (473 К).
3.1. 20 нКл. **3.2.** 30 мН. **3.3.** 3,9 мН. **3.4.** 40 см від заряду $4q$; позитивний. **3.5.** $1,9 \cdot 10^7 \text{ м/с}$; 58° . **3.6.** -2,23 нКл. **3.7.** 0; 60 кВ/м; 30 кВ/м.
3.8. 4,5 Дж. **3.9.** 32 см/с. **3.10.** $0,24 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. **3.11.** $5,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. **3.12.** 15 Кл.
3.13. 2,4 А; $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. **3.14.** 6 хв 40 с. **3.15.** У 3 рази. **3.16.** 127 км.
3.17. 203,3 В; 17 %. **3.18.** 300 Ом. **3.19.** 100 м. **3.20.** 1,2 А. **3.21.** 0,125 В; 7,5 Ом.
3.22. 1,6. **3.23.** 80 %. **3.24.** 1,1 В. **3.25.** 6 В; 1 Ом. **3.26.** 2,4 кВт; 2,3 кВт; 95,5 %.
3.27. $1,26 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$; 7,9 кеВ. **3.28.** 0,28 меВ. **3.29.** 96 МКл/кг; протон.
3.30. $86,7 \cdot 10^6 \text{ м/с}$; $24,5 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$. **3.31.** 1,6 мм; 10 мм; 14,2 мм. **3.32.** 2,8 Мм/с.
3.33. 5 пс; 50 Мм/с. **3.34.** 16,5 Мм/с.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Дущенко В. П.*, Кучерук І. М. Загальна фізика. Фізичні основи механіки / В. Дущенко, І. Кучерук — К.: Вища шк., 1987. — 431 с.
2. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. I / Савельев И. В. — М.: Наука, 1986. — 432 с.
3. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 2. / Савельев И. В. — М.: Наука, 1968. — 336 с.
4. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Механика / Сивухин Д. В. — М.: Наука, 1979. — 520 с.
5. Яворський Б. М. Курс фізики. Т. I / Б. М. Яворський, А. А. Детлаф. — К.: Вища шк., 1970. — 356 с.
6. *Волькенштейн В. С.* Сборник задач по общему курсу физики / Волькенштейн В. С. — М.: Наука, 1979. — 352 с.
7. *Фізика.* Модуль 1. Механіка : [навч. посіб.] / А. Г. Бовтрук, Ю. Т. Герасименко, Б. Ф. Лахін, С. М. Меньяйлов, А. П. Поліщук; за заг. ред. А. П. Поліщука. — К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. — 256 с.
8. *Фізика.* Модуль 2. Молекулярна фізика й термодинаміка : [навч. посіб.] / В. І. Благовістна, А. П. В'яла, С. М. Меньяйлов та ін.; за заг. ред. А. П. Поліщука. — [2-ге вид.]. — К.: Книжкове вид-во НАУ, 2006. — 192 с.
9. *Фізика.* Модуль 3. Електрика і магнетизм : [навч. посіб.] / Б. Ф. Лахін, С. Л. Максимов, А. П. Поліщук, П. І. Чернега; за заг. ред. А. П. Поліщука. — К.: НАУ, 2005. — 336 с.
10. *Иродов И.Е.* Механика. Основные законы / Иродов И.Е. — М.: Физ.-мат. Лит., 2002. — 309 с.

ТАБЛИЦІ ДОВІДОК

Універсальні фізичні константи

Маса Землі	$5,96 \cdot 10^{24}$ кг
Радіус Землі	$6,37 \cdot 10^6$ м
Маса Сонця	$1,97 \cdot 10^{30}$ кг
Радіус Сонця	$6,95 \cdot 10^8$ м
Маса спокою електрона	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Маса спокою протона	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Маса спокою нейтрона	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг · с ²)
Прискорення вільного падіння	$g = 9,81$ м/с ²
Число Авогадро	$N_A = 6,025 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Атомна одиниця маси	1 а.о.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Універсальна (молярна) газова стала	$R = 8,314$ Дж/(моль · К)
Стала Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Елементарний заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Густина речовин

ТВЕРДІ ТІЛА			
Речовина	10 ³ кг/м ³	Речовина	10 ³ кг/м ³
Алюміній	2,7	Олово	7,3
Германій	5,4	Свинець	11,3
Кремній	2,4	Срібло	10,5
Лід	0,9	Сталь	7,8
Мідь	8,9	Хром	7,2
Ніхром	8,4		
РІДИНИ			
Речовина	10 ³ кг/м ³	Речовина	10 ³ кг/м ³
Бензин	0,70	Нафта	0,80
Вода	1,0	Ртуть	13,6
Гас	0,80	Спирт	0,79
ГАЗИ (за нормальних умов)			
Речовина	кг/м ³	Речовина	кг/м ³
Азот	1,25	Повітря	1,29
Водень	0,09	Кисень	1,43

Діаметри атомів та молекул, нм

Гелій (He)	0,20	Кисень (O ₂)	0,30
Водень (H ₂)	0,23	Азот (N ₂)	0,30

Питомі теплосмності речовин

Речовина	$C \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)	Речовина	$C \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)
Алюміній	0,88	Мідь	0,39
Вода	4,19	Нікель	0,46
Гас	2,1	Ртуть	0,1
Залізо	0,46	Свинець	0,13
Золото	0,1	Спирт	2,4
Латунь	0,38	Срібло	0,23
Лід	2,1	Сталь	0,46

Питома теплота плавлення речовин

Речовина	$\lambda, 10^5$ Дж/кг	Речовина	$\lambda, 10^5$ Дж/кг
Алюміній	3,8	Ртуть	0,12
Залізо	2,7	Свинець	0,25
Лід	3,3	Срібло	0,87
Мідь	1,8	Сталь	0,82
Олово	0,59	Чавун	1

Діелектричні проникності речовин

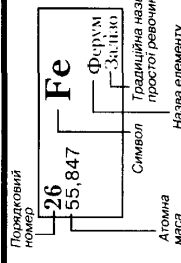
Речовина	ϵ	Речовина	ϵ
Вода	81	Плексиглас	3,3
Гас	2,1	Скло	7,0
Ебоніт	4,3	Слюда	6,0
Парафін	2,1	Спирт	33

**Питомий опір речовин $\rho, 10^{-6}$ Ом·м
та температурний коефіцієнт опору $\alpha, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$**

Речовина	ρ	α	Речовина	ρ	α
Алюміній	0,028		Нікелін	0,420	
Вольфрам	0,055	4,8	Ніхром	1,10	
Залізо	0,12	6,5	Платина	0,10	
Константан	0,480		Ртуть	0,958	
Латунь	0,071		Свинець	0,210	
Манганін	0,450		Срібло	0,016	
Мідь	0,017	4,3	Цинк	0,06	

PERIODICHNA СИСТЕМА ЕЛЕМЕНТИВ Д.І.МЕНДЕЛЄЄВА

PERIOD	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		
1	H 1,0079 Гідроген Водень														He 4,0026 Гелій		
2	Li 6,941 Літій	Be 9,0122 Берилій	B 10,811 Бор	C 12,011 Карбон Вуглець	N 14,007 Нітроген Азот	O 15,999 Оксиген Кисень	F 18,998 Флуор Фтор	Ne 20,179 Неон									
3	Na 22,990 Натрій	Mg 24,305 Магній	Al 26,982 Алюміній	Si 28,086 Силіцій	P 30,974 Фосфор	S 32,065 Сулфур Сірка	Cl 35,453 Хлор	Ar 39,948 Аргон									
4	K 39,098 Калій	Ca 40,078 Кальцій	Sc 44,956 Скандій	Ti 47,88 Титан	V 50,942 Ванадій	Cr 51,996 Хром	Mn 54,938 Манган	Fe 55,847 Залізо	Co 58,933 Кобальт	Ni 58,69 Нікель							
5	Rb 85,468 Рубідій	Sr 87,62 Стронцій	Y 88,906 Йттрій	Zr 91,224 Цирконій	Nb 92,906 Ніобій	Mo 95,94 Молибден	Tc 98 Технецій	Ru 101,07 Рутеній	Rh 106,42 Родій	Pd 106,42 Паладій							
6	Cs 132,91 Цезій	Ba 137,33 Барій	*La 138,91 Лантан	In 114,82 Індій	Sb 121,75 Стибій	Te 127,60 Телур	I 126,90 Йод	Xe 131,29 Ксенон									
7	Fr [223] Францій	Ra 226,03 Радій	*Ac [227] Актиній	Tl 204,38 Талій	Pb 208,98 Свинцевий олово	Bi 208,98 Бісмут	Po [209] Полоній	At [210] Астат	Rn [222] Радон								
8	Ce 140,12 Церій	Pr 140,91 Прометій	Nd 144,24 Неодим	Pm [147] Прометій	Sm 150,36 Самарій	Eu 151,96 Європій	Gd 157,25 Гадоліній	Tb 158,93 Тербій	Dy 162,50 Диспрозій	Ho 164,93 Гольмій	Er 167,26 Ербій	Tm 168,93 Тулій	Yb 173,04 Йттрій	Lu 174,97 Лютецій			
9	Th 232,04 Торій	Pa 231,04 Протактиній	U 238,03 Уран	Np [237] Нептуній	Pu [244] Плутоній	Am [243] Америцій	Cm [247] Кюріцій	Bk [247] Беркелій	Cf [251] Каліфорній	Es [252] Ейнштейній	Fm [257] Фермій	Md [258] Менделєєв	No [259] Нобелій	Lr [260] Лоуренцій			



ЗМІСТ

Вступ.....	3
МОДУЛЬ 1. МЕХАНІКА	5
1.1. Навчальний Елемент. Кінематика	5
1.1.1. Механічний рух. Система відліку.....	5
1.1.2. Способи опису руху матеріальної точки. Основна (пряма) задача кінематики	5
1.1.3. Кінематичні характеристики поступального руху матеріальної точки	6
1.1.4. Обернена задача кінематики.....	9
1.1.5. Рух матеріальної точки по колу	10
1.1.6. Задачі.....	13
1.2. Навчальний Елемент. Динаміка.....	16
1.2.1. Динамічні характеристики поступального руху.....	16
1.2.2. Закони Ньютона	17
1.2.3. Види сил	18
1.2.4. Динамічні характеристики обертального руху абсолютно твердого тіла (АТТ).....	19
1.2.5. Основне рівняння динаміки обертального руху абсолютно твердого тіла	22
1.2.6. Робота, потужність, коефіцієнт корисної дії	22
1.2.7. Енергія. Види механічної енергії	24
1.2.8. Піднімальна сила крила літака.....	26
1.2.9. Задачі	27
1.3. Навчальний Елемент. Закони збереження.....	32
1.3.1. Закони збереження в механіці.....	32
1.3.2. Рух тіла змінної маси. Реактивний рух	33
1.3.3. Удар.....	35
1.3.4. Задачі	39
1.4. Навчальний Елемент. Лабораторні роботи.....	42
1.4.1. Правила заокруглення чисел.....	42
1.4.2. Правила побудови графіків	42
1.4.3. Правила складання протоколу лабораторної роботи.....	43
1.4.4. Похибки вимірювань фізичних величин.....	44
1.4.5. Лабораторна робота. Визначення густини тіл правильної геометричної форми. Розрахунок похибок вимірювань	50
1.4.6. Лабораторна робота. Визначення моменту інерції системи тіл, що обертаються	54

1.5. Навчальний Елемент. Індивідуальні домашні завдання.....	62
1.5.1. Порядок виконання ІДЗ.....	62
1.5.2. Задачі для індивідуального домашнього завдання.....	63
1.5.3. Відповіді до задач.....	72

МОДУЛЬ 2. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА Й ТЕРМОДИНАМІКА. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ 74

2.1. Навчальний Елемент. Молекулярна фізика й термодинаміка.....	74
2.1.1. Деякі основні поняття термодинаміки.....	74
2.1.2. Рівняння стану ідеального газу.....	77
2.1.3. Температура.....	78
2.1.4. Число степенів вільності.....	79
2.1.5. Закон рівномірного розподілу енергії за степенями вільності.....	80
2.1.6. Розподіл Больцмана для частинок у зовнішньому потенціальному полі. Барометрична формула.....	81
2.1.7. Внутрішня енергія термодинамічної системи.....	83
2.1.8. Робота.....	84
2.1.9. Тепло.....	84
2.1.10. Перший принцип термодинаміки.....	86
2.1.11. Застосування першого принципу термодинаміки до ізопроеесів в ідеальних газах.....	86
2.1.12. Теплові машини.....	89
2.1.13. Цикл Карно.....	90
2.1.14. Другий принцип термодинаміки.....	93
2.1.15. Задачі.....	94
2.2. Навчальний Елемент. Електрика.....	98
2.2.1. Електричні заряди та їх взаємодія.....	98
2.2.2. Електричне поле у вакуумі та його характеристики.....	99
2.2.3. Робота в електричному полі.....	101
2.2.4. Потенціал поля і його зв'язок із напруженістю.....	102
2.2.5. Електроємність, конденсатори.....	104
2.2.6. Енергія електричного поля.....	105
2.2.7. Сила струму. Густина струму.....	106
2.2.8. Сторонні сили. Електрорушійна сила.....	106
2.2.9. Закон Ома для однорідної ділянки електричного кола.....	107
2.2.10. Закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола та для замкненого кола.....	109
2.2.11. Потужність струму. Закон Джоуля—Ленца.....	110
2.2.12. Коефіцієнт корисної дії джерела ЕРС.....	110
2.2.13. Задачі.....	111
2.3. Навчальний Елемент. Магнетизм.....	116
2.3.1. Взаємодія струмів. Магнітне поле, магнітна індукція.....	116
2.3.2. Закон Біо—Савара—Лапласа.....	117
2.3.3. Сила Лоренца.....	119
2.3.4. Робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі. Магнітний потік.....	119

2.3.5. Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції Фарадея.....	121
2.3.6. Самоіндукція. Індуктивність.....	122
2.3.7. Задачі.....	123
2.4. Навчальний елемент. Лабораторні роботи.....	124
2.4.1. Лабораторна робота. Визначення відношення мольних теплоємностей газів.....	124
2.4.2. Лабораторна робота. Вимірювання електричних величин.....	130
2.5. Навчальний елемент. Індивідуальні домашні завдання.....	134
2.5.1. Варіанти ІДЗ.....	134
2.5.2. Задачі для індивідуального домашнього завдання.....	135
2.5.3. Відповіді до задач.....	143
Список літератури.....	145
ТАБЛИЦІ ДОВІДОК.....	146