

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

ТЕРМОДИНАМІКА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ (модуль 1)  
для студентів спеціальностей:  
192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
144 «Теплоенергетика»

КИЇВ 2021

УДК 621.1.016.7

Т 38

Укладачі: Ю.М.Кольчик, канд. техн. наук, доцент  
Н.В. Чепурна, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: С.В. Барановська, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний

за випуск: О.В. Приймак, д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри

*Затверджено на засіданні кафедри теплотехніки. Протокол №\_9\_ від  
«03» «червня» 2020 року.*

Видається в авторській редакції.

Термодинаміка: методичні вказівки до практичних занять. / уклад.:  
Т 38 Ю.М.Кольчик, Н.В.Чепурна. – Київ.: КНУБА, 2021. – 24 с.

Методичні вказівки містять стислі загальні положення, задачі та приклади їх розв'язку.

Призначено для студентів спеціальностей: 192 «Будівництво та цивільна інженерія», 144 «Теплоенергетика»

## Загальні положення

“Термодинаміка” – базовий курс, в якому вивчаються закономірності взаємного перетворення теплоти і роботи, властивості тіл, що приймають участь у цьому перетворенні, методи отримання, передачі та використання теплоти, а також принцип дії, конструктивні особливості й методи розрахунку теплових машин і апаратів.

Інженер-будівельник на кожному кроці своєї діяльності повинен пам'ятати про енергозбереження й економічну безпеку. Без знання технічної термодинаміки неможливе впровадження жодного будівельного проекту. Технічна термодинаміка є базовою дисципліною для подальшого вивчення таких курсів як „Теплопередача”, „Тепломасообмін”, „Будівельна теплофізика” та “Теплогазопостачання”.

**ЗМ1.** *Основні поняття та визначення термодинаміки. Технічна термодинаміка як основа теплотехніки, теплоенергетики, і теплофікації. Предмет і метод термодинаміки. Закони термодинаміки. Робоче тіло, термодинамічна система, стан, процес. Рівноважний і нерівноважний стан. Оборотні та необоротні процеси. Теплота та робота . Термічні і калоричні параметри стану. Системи одиниць. Ідеальний газ. Рівняння стану ідеального газу.*

### **Теоретичні основи**

Технічна термодинаміка – наука про закони взаємних перетворень тепла і роботи в різних процесах, а також про властивості робочих тіл, що беруть участь у цих перетвореннях. Такі перетворення відбуваються у теплових двигунах та інших теплових машинах.

У основі термодинамічних досліджень лежить феноменологічний метод, за яким робоче тіло розглядається як суцільне макросередовище без урахування молекулярної будови речовини. Основою такого методу досліджень є застосування I і II законів термодинаміки до аналізу конкретних термодинамічних явищ. Термодинаміка базується на двох фундаментальних законах.

Перший закон термодинаміки – це окремий випадок закону збереження і перетворення енергії; другий закон термодинаміки характеризує особливості теплоти як виду обміну енергією.

Закони термодинаміки характеризують загальні закономірності перетворення енергії в макроскопічних системах. Таким чином, не вивчаючи фізичну сутність теплових процесів термодинаміка може передбачити кінцевий результат.

Об'єктом дослідження у термодинаміці є термодинамічні системи – це сукупність тіл, між якими можлива енергетична взаємодія у формі теплоти і роботи. Окремо взяте макротіло також може розглядатися як термодинамічна

система. Все, що знаходиться поза системою, має назву зовнішнього (навколишнього) середовища. Поверхня, яка розділяє термодинамічну систему і навколишнє середовище називається контрольною. Система вважається термодинамічно ізольованою, якщо вона не обмінюється енергією і речовиною з тілами поза системою. Якщо система не обмінюється речовиною через контрольну поверхню, вона називається замкненою. Якщо система не обмінюється енергією у формі теплоти, то вона називається адіабатною, або теплоізольованою.

Тепло і робота – дві форми потоку енергії, або два види енергетичної взаємодії між тілами.

I форма енергетичної взаємодії зумовлена силовою механічною дією (тиском) одного тіла на друге, яка супроводжується рухом другого тіла. Ця форма називається роботою. Кількість енергії, яка передається від одного тіла до другого у формі направленої руху називається роботою процесу.

II форма енергетичної взаємодії пов'язана з наявністю різниці температур і обумовлена хаотичним рухом великої кількості мікрочастин, які складають макротіла. Обмін енергії в цьому випадку відбувається чи при безпосередньому контакті тіл, які мають різну температуру, чи випромінюванням. Кількість енергії, яка передається від одного тіла до другого в результаті хаотичного руху мікрочастин називається теплою процесу.

Робоче тіло – це фізична речовина, яка бере участь у термодинамічних перетвореннях (перетворення теплоти і роботи), в особистості за допомогою якої у теплових машинах здійснюється перетворення теплової енергії в механічну. Найбільш поширеними є гази і пари, це зумовлено тим, що властивістю газів є значна зміна об'єму при зміні таких термодинамічних параметрів, як тиск і температура, і відповідно можливість здійснення значної роботи стиснення або розширення. На практиці дуже рідко маємо справу з чистими газами. Найчастіше як робочі тіла виступають газові суміші. Робоче тіло у теплових машинах отримує чи віддає тепло при взаємодії з більш нагрітим чи більш холодним зовнішнім тілом. Такі тіла називаються джерелом теплоти.

Відомо, що в різних станах вплив сил взаємодії між молекулами і розмірів молекул на фізичні властивості газів різні. В станах, коли впливом сил взаємодії між молекулами і об'ємом молекул можна знехтувати (це дуже нагрітий газ при невисоких тисках), газ називають ідеальним, в інших станах – реальним.

Термодинамічний стан – сукупність термодинамічних властивостей робочого тіла, що визначаються термодинамічними параметрами. Є дві групи термодинамічних параметрів: термічні і калоричні. параметрами стану. У термодинаміці в першу чергу розглядають рівноважні термодинамічні стани, які змінюються лише під впливом зовнішньої енергетичної дії і при яких по всій масі робочого тіла параметри зберігають однакове значення.

Термічні параметри стану:

**Абсолютний тиск ( $P$  [Па])** - параметр стану робочого тіла, під яким ми розуміємо вилив молекул середовища на стінки твердої оболонки, в якій міститься певне робоче тіло. Тиск вимірюється [Н/м<sup>2</sup>] = [Па]. Співвідношення між одиницями тиску різних систем одиниць наведені в табл. 1.

Абсолютний тиск атмосферного повітря вимірюється барометром і називається барометричним тиском. У вимірюваннях тиску газів, ізольованих від атмосфери користуються манометрами, які показують різницю між абсолютним тиском  $P_{абс}$  в місті вимірювання і зовнішнім атмосферним (барометричним) тиском. Це є надлишковий (манометричний) тиск.

$$P_{абс} = P_{надл} + P_{бар} \Rightarrow P_{надл} = P_{абс} - P_{бар}.$$

Якщо в посудині тиск менший за барометричний, тоді застосовують прилад, який називають вакуумметром. Вакуумметр фіксує розрідження або вакуумметричний тиск  $P_{вак}$ , тобто показує, наскільки тиск у посудині менший за атмосферний, У цьому разі абсолютний тиск

$$P_{вак} = P_{бар} - P_{абс} \Rightarrow P_{абс} = P_{бар} - P_{вак}.$$

Таблиця 1

Значення	Фізична атмосфера, атм	Технічна атмосфера, ат=кг/см <sup>2</sup>	Тиск, бар	Тиск, міліметри ртутного стовпчика
1 атм	1	1,0382	1,0132	760,0
1 ат	0,9678	1	0,9807	735,5
1 бар = 10 <sup>5</sup> Па	0,9869	1,0197	1	750,1
10 <sup>3</sup> мм.рт.ст.	1,3158	1,3595	1,332	1000.0

Тиск можна вимірювати в міліметрах стовпа рідини визначеної густини (мм рт.ст. мм вод. ст.). Тоді зручно користуватися формулою:

$$P = h \cdot \rho \cdot g$$

Наприклад, визначимо, скільки в одній технічній атмосфері мм вод. ст:

$$h = p / (\rho \cdot g) = 9,81 \cdot 10^4 / (10^3 \cdot 9,81) = 10 \text{ м вод.ст.} = 10^4 \text{ мм вод.ст.}$$

Так само можна встановити, що 1 мм рт.ст. = 133,32 Па;

1 атм = 735,6 мм рт.ст.; 1 бар = 750 мм рт. ст.

**Абсолютна температура ( $T$ [К])** – термодинамічний параметр, який визначає стан робочого тіла і є мірою середньої кінетичної енергії поступального руху молекул робочого тіла,  $T$  [К] =  $t$  [°C] + 273,15.

**Питомий об'єм ( $v$  [м<sup>3</sup>/кг])** - об'єм робочого тіла, маса якого дорівнює 1 кг.

Якщо  $V$  – об'єм в м<sup>3</sup>, який займає тіло масою в  $m$  кг, то питомий об'єм:

$$v = \frac{V}{m}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Величина обернена питомому об'єму називається густиною – маса 1 м<sup>3</sup> тіла:

$$\frac{1}{v} = \rho = \frac{m}{V}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Нормальними фізичними умовами називають такі, за яких робоче тіло знаходиться під тиском  $p = 101\,323$  Па при температурі  $T = 273$  К або  $t = 0$  °С, а 1 моль газу займає об'єм у 22,4 л /моль = 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль.

Калоричні параметри стану:

*Питома внутрішня енергія –  $u$  [Дж/кг]* представляє собою запас енергії в 1 кг. робочого тіла, що визначається кінетичною енергією поступального, коливального та обертового руху молекул та потенційною енергією взаємодії молекул.

*Питома ентальпія –  $h$  [Дж/кг]* – представляє собою повну енергію газу, що знаходиться під тиском та дорівнює сумі внутрішньої енергії газу  $u$  [Дж/кг] і потенційної енергії тиску  $Pv$ :

$$h = u + Pv.$$

*Питома ентропія –  $s$  [Дж/(кг·К)]* параметр стану, диференціал якого дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти в елементарному оборотному процесі до абсолютної температури, що є постійною величиною на нескінченно малій ділянці процесу.

$$ds = \frac{\delta q}{T}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Газоподібні робочі тіла вважаються простими тілами, стан яких характеризується значенням двох параметрів. Всі інші термічні параметри можуть бути представлені як функція цих двох.

Термічне рівняння стану має вигляд:  $f(p, v, T) = 0$ .

Для ідеального газу ця залежність може бути представлена рівнянням Клапейрона-Менделєєва:

$$PV_{\mu} = R_{\mu}T \quad (1);$$

$$pv = R T \quad (2);$$

$$PV = mR T \quad (3),$$

де  $P$  – абсолютний тиск [Па];

$V_{\mu}$  – об'єм 1 кмоль газу м<sup>3</sup>/кмоль;

$R_{\mu} = 8314$  [Дж/(кмоль·К)] – універсальна газова стала, однакова для всіх газів;

$T$  – абсолютна температура [К];

$R$  – питома газова стала,

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu}, \quad [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})].$$

$\mu$  – молекулярна маса газу кг/кмоль

### Приклад розв'язку задачі

Повітря, маса якого 1,5 кг при абсолютному тиску 0,4 МПа займає об'єм 0,5 м<sup>3</sup>. Чому дорівнює температура?

Дано:

Рішення:

Газ- повітря

M = 1,5 кг

V = 0,5 м<sup>3</sup>

P = 0,4 МПа

t - ?

1. Визначаємо питому газову сталу для повітря за формулою:

$R = \frac{R_{\mu}}{\mu}$ , де  $R_{\mu} = 8314$  [Дж/(кмоль·К)] – універсальна

газова стала, однакова для всіх газів;  $\mu_{нов} = 28,96$

[кг/кмоль]. Отже,

$$R_{нов} = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{28,96} = 287 \frac{Дж}{кг \cdot К}$$

2. Визначаємо температуру повітря з рівняння стану:

$$PV = mR T \Rightarrow T = \frac{PV}{mR} = \frac{0,4 \times 10^6 \times 0,5}{1,5 \times 287} = 464,58 K$$

Відповідь: t = 191,4°C.

### ЗАДАЧІ

1. Маса 1 м<sup>3</sup> метану при відповідних умовах складає 0,7 кг. Визначити густину та питомий об'єм метану при цих умовах.

2. Визначити питомий об'єм повітря, якщо густина повітря при відповідних умовах складає 1,275 м<sup>3</sup>/кг.

3. Визначити абсолютний тиск і питомий об'єм пари в котлі, якщо манометр показує 1,3 бар, а атмосферний тиск дорівнює 700 мм.рт.ст. при температурі 25°C.

4. Надлишковий тиск у теплообміннику дорівнює 3,2 МПа при барометричному тиску 725 мм.рт.ст Чому дорівнює надлишковий тиск в апараті, якщо показник барометра підвищився до 785 мм.рт.ст, а стан пари залишився незмінним?

5. У скільки разів зміниться тиск пари, яка проходить через турбіну, якщо перед турбіною надлишковий тиск дорівнює 8,95 МПа, а після турбіни розрідження становить 720 мм.рт.ст? Барометричний тиск 1,01 бар.

6. Пневматичний прес діаметром D=0,4 м розвиває зусилля 635 кН. Визначити абсолютний тиск повітря у циліндрі в МПа, якщо барометричний тиск 745 мм.рт.ст

7. Визначити густину та питомий об'єм оксиду вуглецю при нормальних умовах.

8. Чому буде дорівнювати густина повітря при тиску 15 бар і температурі 20°C, якщо густина повітря при нормальних умовах дорівнює 1,293 м<sup>3</sup>/кг.

9. Визначити масу газу  $\text{SO}_2$  в балоні об'ємом  $4 \text{ м}^3$  при температурі  $80^\circ\text{C}$ . Тиск газу за манометром дорівнює 5 бар, а атмосферний тиск дорівнює 740 мм.рт.ст..

10. На скільки більше вміщується в балон, об'єм якого 50 л, метану, ніж азоту, при температурі  $t = 12^\circ\text{C}$  і тиску за манометром  $p=10 \text{ МПа}$ , якщо атмосферний тиск  $B=750 \text{ мм.рт.ст.}$

11. З резервуара ємністю  $V= 55 \text{ л}$  випускається повітря в атмосферу, при цьому тиск повітря, виміряне манометром, зменшується від  $p_1 = 4 \text{ МПа}$  до  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . Визначити масу випущеного повітря, якщо температура його змінилась від  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ , а барометричний тиск  $B=750 \text{ мм.рт.ст.}$

12. До якої температури потрібно нагріти 0,1 кг газу, щоб при незмінному об'ємі  $0,01 \text{ м}^3$  його тиск змінився від 0,5 МПа до 1,5 МПа?

13. Визначити, чи будуть однаковими стани робочого тіла, які характеризуються такими значеннями параметрів: перший стан  $p_1 = 8,3 \text{ МПа}$ ,  $v_1 = 0,006 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; другий стан  $p_2 = 2567 \text{ мм рт. ст.}$ ,  $V_2 = 6 \text{ м}^3$ ;  $m=100 \text{ кг}$ .

14. Яка кількість балонів ємністю 100 л необхідна для перевезення 200 кг кисню, якщо при температурі  $27^\circ\text{C}$  тиск газу в балоні 16 МПа ( по манометру)? Барометричний тиск 760 мм.рт.ст.

15. Балон місткістю 30 л з відкритим вентиляем має масу  $m_1 = 90 \text{ кг}$ . Після того, як компресором в нього було додане повітря, маса балона збільшилася до  $m_2 = 96 \text{ кг}$ . Визначити кінцевий тиск повітря в балоні, якщо температура повітря на початку і в кінці процесу збереглася постійною, дорівнює  $t = 22^\circ\text{C}$ , а барометричний тиск  $B = 750 \text{ мм.рт.ст.}$

16. Повітряний балон, розрахований на граничний абсолютний тиск  $p_{\text{абс.}}=25 \text{ МПа}$ , заповнений повітрям з надмірним тиском  $p_1 = 14,9 \text{ МПа}$ . При пожежі в приміщенні, де знаходився балон, температура повітря в ньому підвищилася до  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ . Чи витримає балон збільшений тиск, якщо відомо, що температура повітря в балоні до пожежі була  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , а барометричний тиск  $B = 750 \text{ мм.рт.ст.}$

17. В циліндрі діаметром  $d = 80 \text{ мм}$  міститься 100 г повітря при надлишковому тиску  $p=0,2 \text{ МПа}$  і температурі  $t_1= 27^\circ\text{C}$ . Зовнішній тиск  $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$  До якої температури слід нагрівати, повітря в циліндрі, щоб поршень, що рухається без тертя, піднявся на 60 мм при постійному тиску в циліндрі?

18. В закритій посудині ємністю  $V = 0,5 \text{ м}^3$  міститься повітря при тиску  $p_1 = 3 \text{ бар}$  і температурі  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Внаслідок охолодження посудини повітря, що міститься в ній, втрачає 120 кДж теплоти. Приймаючи теплоємність повітря сталою, визначити який тиск і яка температура встановляться після цього в посудині, а також зміну калоричних параметрів повітря.

19. Компресор подає стисле повітря в резервуар, при цьому тиск в резервуарі, виміряне манометром, підвищується від  $p_1=0$  до  $p_2=0,7$  МПа, а температура від  $10^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ . Визначити масу повітря, яке подається в резервуар, якщо об'єм балона  $6\text{ м}^3$ , а барометричний тиск  $B=750$  мм.рт.ст.

**ЗМ 2.** Суміші ідеальних газів. Способи завдання газових сумішей. Зв'язок між способами завдання сумішей. Позірна молярна маса та газова стала суміші. Закон Дальтона. Парціальний тиск газу в суміші.

### Теоретичні основи

Газова суміш – це суміш ідеальних газів, які не вступають між собою в хімічні реакції. Окремі газу, що входять до складу суміші, називаються компонентами суміші. Всі величини, що відносяться до компонентів, позначені індексом “ $i$ ”. Для суміші ідеальних газів справедливі всі закони ідеальних газів, тому всі розрахункові рівняння, що отримані під час розгляду процесів ідеальних газів, лишаються справедливими і для газових сумішей, за виключенням визначення питомої газової сталої  $R$ , і зокрема величини  $\mu$  – молекулярна маса суміші, яку зазвичай називають уявна молекулярна маса. Для її визначення треба знати склад газової суміші. Склад газової суміші задається масовими або об'ємними частками.

Масова частка визначається як відношення маси окремого газу, який входить до суміші, до маси всієї суміші:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{сум}}}; \quad \sum g_i = 1,$$

де  $m_i$  - маса окремого компонента;  $m_{\text{сум}}$  - маса всієї суміші.

Об'ємна частка визначається як відношення об'єму окремого газу, який входить до суміші, до загального об'єму суміші при умові, що об'єм кожного компоненту відноситься до тиску і температурі суміші (приведений об'єм):

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{сум}}}; \quad \sum r_i = 1,$$

де  $V_i$  - парціальний об'єм окремого компонента;

$V_{\text{сум}}$  - об'єм всієї суміші.

Мольна частка визначається як відношення числа молей окремого газу, який входить до суміші, до загального числа молей суміші :

$$n_i = \frac{N_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n n_i = 1.$$

На основі закону Авагадро доведено, що об'ємна частка чисельно дорівнює мольній

Відповідно до цього визначаються всі характеристики суміші. Розрахункові рівняння наведені у дод. 1.

### Приклад розв'язку задачі

Атмосферне повітря має приблизно такий склад за масою: кисню - 23,2% та азоту – 76,8%. Визначити об'ємний склад повітря, його газову сталу, середню молекулярну масу, а також парціальні тиски кисню і азоту, якщо барометричний тиск  $V = 0,1$  МПа.

Дано:

Рішення:

$$g_{O_2} = 0,232$$

$$g_{N_2} = 0,768$$

$$r_{O_2} - ?$$

$$r_{N_2} - ?$$

$$R_{\text{сум.}} - ?$$

$$\mu_{\text{сум.}} - ?$$

$$P_{O_2} - ?$$

$$P_{N_2} - ?$$

Визначаємо об'ємний склад суміші згідно рівняння (дод.1)

$$r_{O_2} = \frac{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,232}{32}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,21;$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,768}{28}}{\frac{0,232}{32} + \frac{0,768}{28}} = 0,79$$

$$\text{Перевірка: } \sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

Визначаємо середню молекулярну масу суміші згідно рівняння (дод. 1):

$$\mu_{\text{сум.}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = 0,21 \times 32 + 0,79 \times 28 = 28,84 \text{ кг/кмоль.}$$

Газову сталу для повітря визначаємо згідно рівняння (дод. 1)

$$R_{\text{сум.}} = g_{O_2} R_{O_2} + g_{N_2} R_{N_2} = 0,232 \times 260 + 0,768 \times 295 = 287 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \times \text{град})}.$$

Визначаємо парціальні тиски кисню та азоту згідно рівняння (дод. 1):

$$P_{O_2} = P_{\text{сум.}} \times r_{O_2} = 0,1 \times 0,21 = 0,021 \text{ МПа} = 21 \text{ кПа}$$

$$P_{N_2} = P_{\text{сум.}} \times r_{N_2} = 0,1 \times 0,79 = 0,079 \text{ МПа} = 79 \text{ кПа}$$

$$\text{Перевірка: } P_{\text{сум.}} = \sum_{i=1}^n P_i = 21 + 79 = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа.}$$

Відповідь:  $r_{O_2} = 0,21$ ;  $r_{N_2} = 0,79$ ;  $R_{\text{сум.}} = 287$  [Дж/(кгК)];

$\mu_{\text{сум.}} = 28,84$  кг/кмоль;  $P_{O_2} = 21$  кПа;  $P_{N_2} = 79$  кПа.

## ЗАДАЧІ

2.1 Визначити газову сталу і густину газової суміші, а також парціальні тиски окремих компонентів, якщо суміш складається з 14%  $\text{CO}_2$ , 73%  $\text{N}_2$ , 6%  $\text{O}_2$  і 7%  $\text{H}_2\text{O}$  за об'ємом. Абсолютний тиск суміші дорівнює  $p=0,2$  МПа, а температура  $t=300^\circ\text{C}$ .

2.2 Визначити молекулярну масу, газову сталу, густину і питомий об'єм за нормальних фізичних умов, а також об'ємний склад суміші, якщо заданий її масовий склад: 7%  $\text{N}_2$ , 8%  $\text{H}_2$ , 51%  $\text{CH}_4$ , 5%  $\text{O}_2$ , 19%  $\text{CO}$  і 10%  $\text{CO}_2$ .

2.3 Генераторний газ має такий об'ємний склад:  $\text{H}_2 = 7,0\%$ ;  $\text{CH}_4 = 2,0\%$ ;  $\text{CO} = 27,6\%$ ;  $\text{CO}_2 = 4,8\%$ ;  $\text{N}_2 = 58,6\%$ . Визначити масові частки, позірну молекулярну масу, газову сталу, густину і парціальні тиски при  $t=15^\circ\text{C}$  і  $p=10^5\text{Па}$ .

2.4 В  $1\text{ м}^3$  сухого повітря міститься за об'ємом 21%  $\text{O}_2$  і 79%  $\text{N}_2$ . Визначити масовий склад повітря, його молекулярну масу і газову сталу, а також парціальні тиски кисню і азоту, якщо барометричний тиск  $B = 0,1$  МПа.

2.5 Склад сухого атмосферного повітря за масою  $\text{O}_2 = 23,2\%$  і  $\text{N}_2 = 76,8\%$ . Визначити уявну молекулярну масу і газову сталу повітря, об'ємні частки і парціальні тиски компонентів при барометричному тиску повітря  $B = 0,1$  МПа.

2.6 Продукти згорання мають наступний об'ємний склад:  $\text{CO}_2 - 12,2\%$ ,  $\text{O}_2 - 7,1\%$ ,  $\text{CO} - 0,4\%$  і  $\text{N}_2 - 80,3\%$ . Визначити масовий склад, газову сталу, густину і питомий об'єм суміші, якщо абсолютний тиск суміші  $p=0,5$  МПа, а температура  $t= 27^\circ\text{C}$ .

2.7 Суміш складається з 7 кг водню і 93 кг окису вуглецю. Визначити газову сталу і густину суміші, а також парціальні тиски водню і окису вуглецю, якщо абсолютний тиск суміші  $p=0,4$  МПа, а температура  $t= 15^\circ\text{C}$ .

2.8 Суміш складається з 6 кмоль азоту і 4 кмоль вуглекислого газу. Визначити газову сталу і густину суміші за нормальних фізичних умов, а також її масовий склад.

2.9 Суміш складається з 18%  $\text{H}_2$ , 24%  $\text{CO}$ , 6%  $\text{CO}_2$  і 52%  $\text{N}_2$  за об'ємом. Визначити газову сталу, густину і масовий склад суміші, якщо абсолютний тиск суміші  $p = 0,4$  МПа, а температура  $t=35^\circ\text{C}$ .

**ЗМ 3.** Теплоємність. Фізичний зміст. Види теплоємності. Одиниці виміру. Методи визначення теплоти термодинамічного процесу за допомогою теплоємності та ентропії.

### Теоретичні основи

Теплоємністю називається кількість теплоти, яку необхідно підвести або відвести від робочого тіла в термодинамічному процесі, щоб змінити його температуру на один градус. В залежності від температурного інтервалу розрізняють істинну і середню теплоємності. Істинною теплоємністю називається кількість теплоти, віднесена до нескінченно малої зміни

температури. Середньою теплоємністю ( $C_m$ ) називається теплоємність віднесена до кінцевої різниці температур, [Дж/град].

У термодинамічних розрахунках розглядається питома теплоємність, віднесена до одиниці кількості речовини. Тому розрізняють масову теплоємність, віднесену до 1 кг робочого тіла  $C$  [Дж/(кг×град)]; об'ємну, віднесену до 1 м<sup>3</sup> газу за нормальних фізичних умов  $C'$  [Дж/(м<sup>3</sup>×град)] і молярну, віднесену до 1 кмоль  $\mu C$  [Дж/(кмоль×град)].

Масова теплоємність визначається:

$$C = \frac{\mu}{\mu} C' = C' \times \nu,$$

а об'ємна теплоємність:

$$C' = \frac{\mu C}{V\mu} = \frac{\mu C}{22,4} = \rho_n \times C$$

де  $\rho_n$  - густина газу за нормальних умов.

Теплоємність не є параметром стану робочого тіла і для будь-якого газу залежить від характеру термодинамічного процесу. Оскільки кількість теплоти залежить від характеру процесу, то і теплоємність залежить від умов протікання процесу теплообміну.

Основний практично використовується теплоємність в процесах при сталому об'ємі ( $C_v$ ) і сталому тиску ( $C_p$ ). Між молярними теплоємностями при сталому об'ємі і сталому тиску існує така залежність:

$$\mu C_p - \mu C_v = \mu R;$$

$$C_p - C_v = R.$$

ця залежність встановлена Майером.

У табл. 2 наведені наближені значення величин  $\mu C_v$  і  $\mu C_p$  для ідеальних газів, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії теплоємності.

Таблиця 2

Газ	Теплоємність, кДж/(кмоль×К)		$K=C_p/C_v$
	$\mu C_v$	$\mu C_p$	
Одноатомний	12,5	20,8	1,67
Двохатомний	20,8	29,1	1,4
Багатоатомний	29,1	37,4	1,3

Для визначення кількості теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг газу в інтервалі температур від  $t_1$  до  $t_2$ , використовують формулу:

$$q = (C_m)_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = C_{m_2} t_2 - C_{m_1} t_1,$$

Якщо в ізобарному чи ізохорному процесах участвують  $m$  кг або  $V_{н.у.}$  газу, то кількість теплоти знаходиться за формулою:

$$Q_p = m C_p (t_2 - t_1) = V_{н.у.} C'_p (t_2 - t_1) \quad (4)$$

або

$$Q_v = m C_v (t_2 - t_1) = V_{н.у.} C'_v (t_2 - t_1) \quad (5).$$

Для практичних розрахунків залежність теплоємності від температури представляють в вигляді рівняння:

$$C = a + bt.$$

Теплоємність газової суміші визначається за формулами наведеними в дод.1.

### Приклад розв'язку задачі

В балоні об'ємом 300 л знаходиться кисень при тиску  $p_1 = 2$  бар та температурі  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Яку кількість теплоти слід підвести, щоб температура кисню підвищилась до  $t_2 = 300^\circ\text{C}$ ? Який тиск встановиться при цьому в балоні? Залежність теплоємності від температури прийняти нелінійною.

Дано:

Рішення:

Газ- $\text{O}_2$ $V = 300\text{л} = 0,3\text{м}^3$ $p_1 = 2 \text{ бар} = 0,2 \text{ МПа}$ $t_1 = 20^\circ\text{C}$ $t_2 = 300^\circ\text{C}$	Визначаємо кількість теплоти в ізохорному процесі при $v = \text{const}$ , згідно рівняння (5): $Q = V_{н.у.} (C'_{vm2} \times t_2 - C'_{vm1} \times t_1),$
Q-?	де $V_{н.у.}$ - об'єм газу приведений до нормальних умов.
$p_2$ -?	Величина $V_{н.у.}$ визначається з рівняння стану:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_{н.у.} V_{н.у.}}{T_{н.у.}},$$

Отже

$$V_{н.у.} = \frac{p_1 V_1 T_{н.у.}}{p_{н.у.} T_1} = \frac{0,2 \times 0,3 \times 273}{0,1013 \times (273 + 20)} = 0,552 \text{ м}^3.$$

Значення теплоємностей визначаємо по табл.IV [4].

Отже,

$$Q = 0,552 \times (0,9852 \times 300 - 0,9374 \times 20) = 152,8 \text{ кДж}.$$

Кінцевий тиск можна визначити з рівняння стану для початкового та кінцевого стану кисню:

$$p_1 V = R_{o_2} T_1; \quad p_2 V = R_{o_2} T_2;$$

Отже,

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,2 \frac{573}{293} = 0,39 \text{ МПа}$$

**Відповідь:**  $Q = 152,8 \text{ кДж}$ ;  $p_2 = 0,39 \text{ МПа}$ .

## ЗАДАЧІ

3.1 Знайти середню теплоємність ізохорну та ізобарну в межах температур від 200°C до 800°C для вуглекислого газу, вважаючи залежність теплоємності від температури лінійною.

3.2 Скільки необхідно затратити теплоти на нагрівання 4 кг повітря при сталому тиску від 100°C до 500°C?

**ЗМ 4.** Термодинамічний процес. Аналіз основних термодинамічних процесів з ідеальним газом.

### Теоретичні основи

Термодинамічним процесом називається будь яка зміна стану робочого тіла, пов'язана зі зміною параметрів і зумовлена енергетичною взаємодією з навколишнім середовищем.

Основні термодинамічні процеси:

- Ізохорний процес ( $v = const$ );
- Ізобарний процес ( $p = const$ );
- Ізотермічний процес ( $T = const$ );
- Адіабатний процес ( $s = const$ ;  $q = 0$ );

Політропний процес ( $C_n = const$ ).

Задачею аналізу будь-якого термодинамічного процесу є встановлення закономірностей зміни параметрів стану робочого тіла і виявлення особливостей перетворення енергії.

З цією метою:

- 1) Виводиться рівняння процесу в  $p$ - $v$ -координатах, використовуючи рівняння Клапейрона-Менделєєва(1-3);
- 2) встановлюється залежність між параметрами, що змінюються, у процесі;
- 3) визначається зміна внутрішньої енергії  $\Delta u$  (Дж/кг) між початковим і кінцевим станом процесу:

$$\Delta u = C_v \Delta T ;$$

- 4) знаходиться зміна ентальпії  $\Delta h$  (Дж/кг) між початковим і кінцевим станом процесу:

$$\Delta h = C_p \Delta T ;$$

- 5) знаходиться зміна ентропії  $\Delta s$ , ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ) між початковим і кінцевим станом процесу:

$$\Delta s = C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} ,$$

$$\Delta s = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} ,$$

- 6) визначається термодинамічна робота газу  $l$ ,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  ;

- 7) визначається зовнішня теплота  $q$   $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  , необхідна для здійснення процесу.

Отримані таким способом дані дозволяють розглянути особливості перетворення енергії в процесі і скласти схему енергобалансу.

### Приклади розв'язку задач

1. Повітря об'ємом  $V_1 = 2 \text{ м}^3$  з початковою температурою  $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  розширюється при сталому тиску до  $V_2 = 3 \text{ м}^3$  внаслідок надання газу 837 кДж теплоти. Визначити кінцеву температуру, тиск газу у процесі і роботу розширення.

Дано:

Газ- повітря

$$V_1 = 2 \text{ м}^3$$

$$V_2 = 3 \text{ м}^3$$

$$t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$$

$$Q = 837 \text{ кДж}$$

$$p = \text{const}$$

---

$$T_2, p, L - ?$$

Рішення:

1. Згідно зі співвідношенням основних параметрів стану в ізобарному процесі визначимо кінцеву температуру:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{mv_2}{mv_1} = \frac{V_2}{V_1},$$

$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{3}{2} \cdot 288 = 432 \text{ K}.$$

2. Розрахуємо роботу розширення газу в ізобарному процесі. Питома робота розширення, кДж/кг:

$$l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1),$$

Якщо у процесі бере участь робоче тіло масою  $m$  кг, на що вказують одиниці виміру об'ємів  $V_1$  і  $V_2$ , м<sup>3</sup>, тоді

$$L = m R (T_2 - T_1),$$

де  $R$  - питома газова стала, Дж/(кг·К).

3. Обчислимо масу повітря. Як відомо, кількість теплоти в ізобарному процесі визначиться із співвідношення  $Q = m C_p (T_2 - T_1)$ ,

де  $C_p$  - ізобарна, масова теплоємність, кДж/(кг·К).

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu},$$

$\mu C_p$  - мольна ізобарна теплоємність, кДж/(кмоль·К), (табл..3)

$$C_p = \frac{29.2}{29} = 1.007, \text{ кДж/(кг·К)}.$$

$$\text{Тоді } m = \frac{Q}{C_p (T_2 - T_1)} = \frac{837}{1.007 \times (432 - 288)} = 5.772 \text{ кг}$$

4. Знаючи масу повітря, підрахуємо роботу розширення газу, але спочатку знайдемо газову сталу:

$$R = \frac{R\mu}{\mu} = \frac{8314}{29} = 287 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

$$L = 5.772 \cdot 287 \cdot (432 - 288) = 238545.22 \text{ Дж} = 238.5 \text{ кДж}$$

5. Тиск процесу визначимо як частку від ділення роботи розширення газу на різницю об'ємів:

$$p = \frac{L}{(V_2 - V_1)} = \frac{238.5}{(3 - 2)} = 238.5 \text{ кПа} = 0.2385 \text{ МПа}.$$

Відповідь:  $T_2 = 432 \text{ K}$ ,  $p = 0.2385 \text{ МПа}$ ,  $L = 238.5 \text{ кДж}$

2. При ізохорному підведенні теплоти ентальпія азоту зростає на 104,3 кДж/кг. Визначити питому теплоту процесу і зміну тиску у цьому процесі, якщо питомий об'єм робочого тіла дорівнює  $V = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Теплоємність азоту вважати незалежною від температури.

Дано:

Газ-  $N_2$   
 $v = \text{const}$   
 $\Delta h = 104,3 \text{ кДж/кг}$   
 $v = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$

$q, \Delta p$  - ?

Рішення:

1. У задачі не задано параметри у кінці процесу, але дано зміну ентальпії азоту, знаючи яку, можемо визначити різницю температур газу в кінці і на початку процесу. Для цього знайдемо ізобарну масову теплоємність азоту:

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu} = \frac{29,1}{28} = 1,043 \text{ кДж/(кг·K)},$$

а потім розрахуємо різницю температур:

$$\Delta T = \frac{q}{c_p} = 104,3/1,043 = 100 \text{ K.}$$

2. Знайдене значення  $\Delta T$  дає можливість визначити питому кількість теплоти в ізохорному процесі. Як відомо, у процесі  $v = \text{const}$  теплота дорівнює зміні внутрішньої енергії:

$$q = \Delta u = C_v \Delta T.$$

Знайдемо масову теплоємність азоту згідно з табл. 3

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu} = 20,8/28 = 0,746 \text{ кДж/(кг·K)}$$

$$q = 0,746 \cdot 100 = 74,6 \text{ кДж/кг}$$

3. Залишилось визначити зміну тиску у процесі  $\Delta p$ . Запишемо рівняння Клапейрона-Менделєєва для початкового та кінцевого стану процесу:

$$p_1 v = R T_1; \quad p_2 v = R T_2; \quad R = \frac{R \mu}{\mu} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ Дж/(кг·K)}$$

$$\text{Тоді } \Delta p = \frac{R}{v} \cdot \Delta T = \frac{297}{0,2} \cdot 100 = 148500 \text{ Па} = 0,1485 \text{ МПа.}$$

**Відповідь:**  $q = 74,6 \text{ кДж/кг}$ ,  $\Delta p = 0,1485 \text{ МПа}$ .

## ЗАДАЧІ

4.1 2 кг азоту з початковими температурою  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$  нагрівається при постійному об'ємі до температури  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ . Визначити кінцевий тиск газу, кількість тепла, що підводиться до нього і зміну його ентропії.

4.2 3 кг повітря з початковими температурою  $t_1 = 12^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1 = 0,9 \text{ МПа}$  нагріваються при постійному об'ємі до температури

$t_2=375^\circ\text{C}$ . Визначити кінцевий тиск газу, кількість тепла, що підводиться до нього і зміну його ентропії.

4.3  $5\text{ м}^3$  кисню з початковими температурою  $t_1=75^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1=0,1\text{ МПа}$  нагріваються при постійному об'ємі так, що його абсолютний тиск підвищується до  $p_2=0,3\text{ МПа}$ . Визначити кінцеву температуру газу, кількість тепла, що підводиться до нього і зміну його ентропії.

4.4  $6\text{ кг}$  окису вуглецю з початковими температурою  $t_1=240^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1=0,5\text{ МПа}$  охолоджуються при постійному об'ємі до температури  $t_2=130^\circ\text{C}$ . Визначити кінцевий тиск газу, кількість тепла, що відводиться від нього і зміну його ентропії.

4.5  $7\text{ м}^3$  вуглекислого газу з початковими температурою  $t_1=570^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1=0,7\text{ МПа}$  охолоджуються при постійному об'ємі так, що його абсолютний тиск зменшується до  $p_2=0,3\text{ МПа}$ . Визначити кінцеву температуру газу, кількість тепла, що відводиться від нього і зміну його ентропії.

4.6  $4\text{ кг}$  водню з початковою температурою  $t_1=0^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1=0,1\text{ МПа}$  нагрівається при постійному тиску до температури  $t_2=230^\circ\text{C}$ . Визначити початковий і кінцевий об'єм газу, кількість підведеної теплоти та зміну його ентропії.

4.7  $2\text{ кг}$  азоту з початковою температурою  $t_1=150^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1=0,3\text{ МПа}$  нагрівається при постійному тиску до температури  $t_2=370^\circ\text{C}$ . Визначити початковий і кінцевий об'єм газу, кількість підведеної теплоти та зміну його ентропії.

4.8  $3\text{ м}^3$  кисню з початковою температурою  $t_1=70^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1=0,3\text{ МПа}$  нагрівається при постійному тиску до температури  $t_2=350^\circ\text{C}$ . Визначити кінцевий об'єм газу, кількість підведеної теплоти та зміну його ентропії.

4.9 Деякій кількості повітря надається при  $p=\text{const}$  теплота у кількості  $41,8\text{ кДж}$ . Знайти виконану при цьому роботу розширення. Взяти  $C_p=1\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

4.10 При ізотермічному стисненні  $V=2,1\text{ м}^3$  азоту, взятого при  $p_1=1\text{ МПа}$ , від газу відводиться  $335\text{ кДж}$  теплоти. Знайти кінцевий об'єм  $V_2$ , кінцевий тиск і затрачену роботу.

4.11 При ізотермічному стисненні  $0,3\text{ м}^3$  кисню, початкові параметри якого  $p_1=1\text{ МПа}$  і  $t_1=300^\circ\text{C}$  відводиться  $500\text{ кДж}$  енергії. Визначити кінцевий тиск і зміну ентропії у процесі.

4.12  $2\text{ м}^3$  повітря з початковою температурою  $t_1=15^\circ\text{C}$  розширюється при сталому тиску до  $3\text{ м}^3$  внаслідок отримання  $837\text{ кДж}$  теплоти. Визначити кінцеву температуру газу і тиск у процесі. При розв'язанні задачі вважати теплоємність незалежною від температури.

4.13 У камері згорання газової турбіни тиск пальної суміші  $p_1=1,2\text{ бар}$  при  $t_1=40^\circ\text{C}$ . Після підведення теплоти (спалювання) при  $v=\text{const}$  температура

підвищилась до  $t_2=1200^\circ\text{C}$ , Визначити тиск у кінці процесу.

4.14 Повітря об'ємом  $V_1 = 3000$  л розширюється ізобарно зі збільшенням об'єму у 1,5 рази. При цьому підводиться теплота у кількості 627 кДж. Визначити тиск, при якому проходить процес розширення та роботу, яка відбувається, якщо  $C_p = 1$  кДж/(кг·К).

4.15 2 кг вуглекислого газу з початковою температурою  $t_1 = 250^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1 = 0,8$  МПа охолоджується при постійному тиску до температури  $t_2 = 150^\circ\text{C}$ . Визначити початковий і кінцевий об'єм газу, кількість відведеної теплоти та зміну його ентропії.

4.16 5 м<sup>3</sup> окису вуглецю з початковою температурою  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  і абсолютним тиском  $p_1 = 0,6$  МПа охолоджується при постійному тиску до температури  $t_2 = 170^\circ\text{C}$ . Визначити кінцевий об'єм газу, кількість відведеної теплоти та зміну його ентропії.

4.17 Ідеальний газ ( $\mu = 28$  кг/кмоль) у кількості 800 г міститься у посудині об'ємом 485 л при  $p_1 = 1,5$  бар. Визначити масову ізобарну і масову ізохорну теплоємності ( $C_p$  і  $C_v$ ) цього газу, якщо при нагріванні до температури  $225^\circ\text{C}$  його ентальпія збільшилась на 42 ккал.

4.18 Повітря при тиску  $p_1 = 0,45$  МПа, розширюючись адіабатно до  $p_2 = 0,12$  МПа, охолоджується до температури  $t_2 = -45^\circ\text{C}$ . Визначити початкову температуру і питому роботу у процесі.

4.19 Кисень при тиску  $p_1 = 1$  бар і об'ємі  $V_1 = 300$  л адіабатно стискають з витратою роботи 73,5 кДж. Визначити кількість кисню, початкову температуру і тиск у кінці стиснення, якщо кінцева температура 600 К, а показник адіабати  $K = 1,4$ .

4.20 . Посудину на 60 л заповнено киснем при тиску  $p_1 = 12,5$  МПа. Розрахувати кінцевий тиск кисню і кількість переданої йому теплоти, якщо початкова температура кисню  $10^\circ\text{C}$  а кінцева  $30^\circ\text{C}$ . Теплоємність кисню вважати незалежною від температури.

4.21 При ізохорному підведенні теплоти ентальпія кисню зростає на 838 кДж/кг. Визначити питому кількість теплоти, а також зміну тиску у цьому процесі, якщо питомий об'єм робочого тіла  $v = 0,5$  м<sup>3</sup>/кг. Теплоємність кисню вважати незалежною від температури.

4.22 . Об'єм повітря при адіабатному стисненні у циліндрі двигуна внутрішнього згорання зменшується у 13 разів. Початкова температура стиснення  $t_1 = 77^\circ\text{C}$ , початковий тиск  $p_1 = 0,09$  МПа. Визначити температуру і тиск повітря після стиснення.

4.23 Ідеальний газ, який має параметри  $p_1, t_1$  охолоджується ізохорно до тиску  $p_2$ , а потім ізотермічно стискають до початкового тиску. Відобразити вказані процеси на  $p$ - $v$  і  $T$ - $s$  діаграмах.

- 4.24 У якому процесі ідеального газу вся підведена теплота витрачається на зміну ентальпії? Наведіть схему енергобалансу цього процесу.
- 4.25 Ідеальний газ, що має початкові параметри  $p_1$  і  $t_1$ , ізохорно охолоджують до температури  $t_2$ , а потім адіабатно стискають до початкового тиску. Відобразити вказані процеси на  $pV$  і  $Ts$  діаграмах.
- 4.26 Як будуть відноситися між собою значення робіт ізоермічного процесу, визначені для однакової маси різних газів за інших однакових умов?
- 4.27 На стиснення газу витрачено роботу 83 кДж, при цьому внутрішня енергія збільшилась на 83 кДж. Якій схемі енергобалансу відповідає розподіл енергії у вказаному процесі? Який це процес?
- 4.28 Ідеальний газ, який має початкові параметри  $p_1$  і  $t_1$ , ізобарно розширюється до температури  $t_2$ , а потім ізохорно охолоджується до початкової температури. Відобразити вказані процеси на  $pV$ - і  $Ts$  діаграмах.
- 4.29 В якому процесі при розширенні ідеальний газ охолоджується (знижує свою температуру). Наведіть схему енергобалансу.
- 4.30 Внутрішня енергія газу у процесі збільшилась на 70 кДж, при цьому газ виконав роботу 70 кДж. Знайдіть теплоту процесу, побудуйте схему енергобалансу.
- 4.31 Ідеальний газ, що має початкові параметри  $p_1$  і  $t_1$ , ізоермічно стискається до тиску  $p_2$ , а потім відбувається відведення теплоти при сталому об'ємі, при цьому тиск зменшується до початкового. Відобразити ці процеси на  $pV$ - і  $Ts$  діаграмах.
- 4.32 На стиснення газу витрачено роботу 60 кДж з одночасним підведенням теплоти у кількості 60 кДж. Знайти зміну внутрішньої енергії у процесі, побудувати схему енергобалансу.
- 4.33 Ідеальний газ, що має початкові параметри  $p_1$  і  $v_1$ , ізобарно розширюється до об'єму  $v_2$ , а потім ізоермічно стискається до початкового об'єму. Відобразити вказані процеси на  $pV$  і  $Ts$  діаграмах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Алабовский А.Н., Недужий И.А.* Техническая термодинамика и теплопередача: учебник. – К: Вища шк., 1990. – 255 с.
2. *Кириллин В.А. и др.* Техническая термодинамика: учебник. – М.: Энергия, 1979. – 472с.
3. *Нащекин В.В.* Техническая термодинамика и теплопередача: учебник. – М.: Высш. шк., 1980. – 470 с.
4. *Рабинович О.И.* Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 376 с.
5. *Чеботарьов В.О., Беркута А.Д.* Технічна термодинаміка: підручник. – К: Вища шк., 1969.- 280 с.
6. *Ларионов Н.Н.* Теплотехника: учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1985, - 432 с.
7. *Швец И.Т., Толубинский В.И., Алабовский А.Н. и др.* Теплотехника: учебник. – Киев: Вища шк., 1976. – 520 с.
8. *Андреанова Т.Н. и др.* Сборник задач по технической термодинамике: – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
9. *Чечеткин А.В., Знаменосец Н.А.* Теплотехника: учебник. – М.: Высш. шк., 1986. – 444с.
10. *Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. и др.* Теплотехника: учебник для вузов / под ред. Баскакова А.П. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
11. *Алабовский А.Н. и др.* Теплотехника: учебник. – Киев: Вища шк., 1986. – 255 с.
12. *Панкратов Г.П.* Сборник задач по теплотехнике. – М.: Высш. шк., 1986. – 248с.
13. *Вукалович М.П., Новиков И.И.* Термодинамика: учебник. – М.: Машиностроение, 1972. – 670 с.
14. *Кушнырев В.И. и др.* Техническая термодинамика и теплопередача: учебник. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
15. *Арнольд Л.В. и др.* Техническая термодинамика и теплопередача: учебник. – М.: Высш. шк., 1979. – 450 с.
16. *Алексеев Г.Н.* Общая теплотехника: учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1980. – 410 с

Заданий склад суміші	Визначуваний склад суміші	Уявна молярна маса суміші, $\mu_{\text{сум}},$ $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	Питома газова стала суміші, $R_{\text{сум}},$ $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \times \text{К})}$	Питомий об'єм суміші, $v_{\text{сум}},$ $\text{м}^3/\text{кг}$ при нормальних умовах $v_{\text{сум.н.у}},$ $\text{м}^3/\text{кг}$	Густина суміші, $\rho_{\text{сум}},$ $\text{кг}/\text{м}^3$ при нормальних умовах $\rho_{\text{сум.н.у}},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	Парціальний тиск компонентів суміші, $P_i,$ Па	Тепломність суміші масова: $C_{\text{сум}},$ $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \times \text{К})}$ об'ємна: $C'_{\text{сум}},$ $\frac{\text{Дж}}{(\text{м}^3 \times \text{К})}$
Масовий $g_i$	$r_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$\mu_{\text{сум}} = \frac{8314}{R_{\text{сум}}}$ $\mu_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R_{\text{сум}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум}}}$ $R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i$	$v_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n g_i v_i$ $v_{\text{сум.н.у}} = \frac{22,4}{\mu_{\text{сум}}}$	$\rho_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}$ $\rho_{\text{сум.н.у}} = \frac{\mu_{\text{сум}}}{22,4}$	$P_{\text{сум}} \times \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$C_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n g_i c_i$ $C'_{\text{сум}} = \rho_{\text{сум}} C_{\text{сум}}$
Об'ємний $r_i$	$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$	$\mu_{\text{сум}} = \frac{8314}{R_{\text{сум}}}$ $\mu_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i$	$R_{\text{сум}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум}}}$ $R_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}}$	$v_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{v_i}}$ $v_{\text{сум.н.у}} = \frac{22,4}{\mu_{\text{сум}}}$	$\rho_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i$ $\rho_{\text{сум.н.у}} = \frac{\mu_{\text{сум}}}{22,4}$	$P_{\text{сум}} \times r_i$	$C_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n r_i c'_i$

Навчально-методичне видання

## ТЕРМОДИНАМІКА

Методичні вказівки  
до практичних занять (модуль 1)  
для студентів спеціальностей:  
192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
144 «Теплоенергетика»

Укладачі: КОЛЬЧИК Юлія Миколаївна  
ЧЕПУРНА Наталія Володимирівна