

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Теплотехніка та теплові двигуни»

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

і завдання до виконання практичних робіт

Частина I

Харків – 2011

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Теплотехніка і теплові двигуни” 21 березня 2011 року, протокол № 5.

У методичних вказівках викладені методичні рекомендації до виконання практичних завдань дисципліни “Технічна термодинаміка” для студентів спеціальності “Теплоенергетика” денної і заочної форм навчання, сформульовані контрольні питання, тестові і розрахункові завдання.

Укладачі:

доценти Ю.А. Бабіченко,
В.І. Рубльов

Рецензент

доц. В.В. Савенко

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
і завдання до виконання практичних робіт

Частина I

Відповідальний за випуск Бабіченко Ю.А.

Редактор Решетилова В.В.

Підписано до друку 22.04.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,5. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Теплотехніка та теплові двигуни»

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Методичні вказівки і завдання
до виконання практичних робіт

Частина I

Харків
2011

Методичні вказівки розглянуті і рекомендовані до друку на засіданні кафедри “Теплотехніка і теплові двигуни” 21 березня 2011 року, протокол № 5.

У методичних вказівках викладені методичні рекомендації до виконання практичних завдань дисципліни “Технічна термодинаміка” для студентів спеціальності “Теплоенергетика” денної і заочної форм навчання, сформульовані контрольні питання, тестові завдання і розрахункові завдання.

Укладачі:
доцент Ю.А. Бабіченко,
доцент В.І. Рубльов

Рецензент:
доцент Савенко В.В.

ЗМІСТ

	ВСТУП	4
ТЕМА 1.	Параметри стану робочого тіла	5
ТЕМА 2.	Рівняння стану ідеального газу	9
ТЕМА 3.	Газові суміші	13
ТЕМА 4.	Перший закон термодинаміки. Теплоємність газів	18
ТЕМА 5.	Термодинамічні процеси ідеальних газів	27
ТЕМА 6.	Другий закон термодинаміки	45
ТЕМА 7.	Цикл Карно	52
ТЕМА 8.	Ексергія робочого тіла. Утрата працездатності термодинамічної системи	57
ТЕМА 9.	Водяна пара. Аналітичні методи розрахунку	62
ТЕМА 10.	Водяна пара. Графічні методи розрахунку	69
ТЕМА 11.	Вологе повітря	74
ТЕМА 12.	Витікання газів і пари	80
ТЕМА 13.	Дроселювання газів і пари	88
ТЕМА 14.	Змішування газів і пари	91
ТЕМА 15.	Компресія газів	96
	ПИТАННЯ ДО ЗАЛІКУ	104
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	108
	ДОДАТОК А	109
	ДОДАТОК Б	110
	ДОДАТОК В	114

ВСТУП

Технічна термодинаміка як навчальна дисципліна спрямована на формування знань основних законів термодинаміки і термодинамічних процесів, термодинамічних властивостей речовин і фазових переходів; термодинамічних циклів компресорів, теплових двигунів і холодильних машин; принципи роботи, схеми і методи термодинамічного аналізу ефективності роботи теплотехнічного обладнання.

Дисципліна «Технічна термодинаміка» є базовою для вивчення у подальшому всіх спеціальних дисциплін для студентів спеціальності «Теплоенергетика». «Технічна термодинаміка» базується на знаннях, отриманих при вивченні курсів фізики, хімії та вищої математики, та вивчається студентами протягом двох семестрів.

Методичні вказівки і завдання до виконання практичних робіт (частина I) містять усі теми у відповідності до програми навчальної дисципліни. Кожна окрема тема складається з теоретичної частини, що містить основні визначення і розрахункові залежності, за допомогою яких студент може самостійно розв'язувати завдання та закріпити лекційний матеріал. Крім того, кожна тема містить практичні завдання для розв'язання й тестові завдання, які покликані закріпити засвоєний теоретичний матеріал і допоможуть підготуватися до модульного контролю. Методичні вказівки містять перелік залікових питань та необхідний довідковий матеріал.

ТЕМА 1. ПАРАМЕТРИ СТАНУ РОБОЧОГО ТІЛА

Фізичний стан тіла визначається величинами, що характеризують деякий його стан, які мають назву *параметри стану*.

При відсутності силових полів стан однорідного тіла може бути визначений трьома параметрами: питомий об'єм, абсолютна температура та абсолютний тиск.

Якщо V – об'єм, m^3 , що займає тіло масою M , кг, то *питомий об'єм, m^3/kg ,*

$$\nu = \frac{V}{M}. \quad (1.1)$$

Абсолютний тиск – тиск, що відраховується від абсолютного нуля тиску або від абсолютного вакууму.

Абсолютний тиск визначається зі співвідношень:

$$P_{абс} = P_{ман} + B, \quad (1.2)$$

$$P_{абс} = B - P_{вак}; \quad (1.3)$$

де B – атмосферний (барометричний) тиск, Па;

$P_{ман}$ – манометричний тиск, Па;

$P_{вак}$ – вакуумметричний тиск, Па.

Співвідношення між одиницями об'єму наведено в таблиці 1.1.

При вимірюванні тиску висотою ртутного стовпчика слід мати на увазі, що показання приладу (барометра, ртутного манометра) залежить не тільки від тиску вимірюваного середовища, але й від температури ртуті, оскільки зі зміною останньої змінюється також і густина ртуті.

Приведення показань ртутного барометра до $0^\circ C$ легко здійснити за допомогою співвідношення:

$$B_o = B (1 - 0,000172t), \quad (1.4)$$

де B_o – показання барометра, приведенного до $0^\circ C$;

B – дійсна висота ртутного стовпчика при температурі повітря $t, ^\circ\text{C}$;

$0,000172$ – коефіцієнт об'ємного розширення ртуті.

Таблиця 1.1 – Співвідношення між одиницями об'єму

Одиниці	<i>Па</i>	<i>бар</i>	Технічна атмосфера <i>ат</i>	Фізична атмосфера <i>атм</i>	Міліметр водяного стовпчика, <i>мм вод. ст.</i>	Міліметр ртутного стовпчика, <i>мм рт. ст.</i>
<i>1 Па</i>	1	10^{-5}	$1,01972 \cdot 10^{-5}$	$0,98692 \cdot 10^{-5}$	0,102	$7,5 \cdot 10^{-3}$
<i>1 бар</i>	10^5	1	1,01972	0,98692	$10,2 \cdot 10^3$	750,06
<i>1 кгс/см² (ат)</i>	98066,5	0,980665	1	0,96784	10^4	785,56
<i>1 атм</i>	101325	1,01325	1,03323	1	10332	760
<i>10⁴ мм вод. ст.</i>	98066,5	0,980665	1	0,96784	10^4	735,56
<i>10³ мм вод. ст.</i>	133322	1,33322	1,35951	1,31579	$1,35951 \cdot 10^4$	10^3

Температуру за міжнародною практичною температурною шкалою, відраховувану від $0 ^\circ\text{C}$, позначають через t , а температуру за абсолютною шкалою, відраховувану від температури абсолютного нуля, позначають через T і називають *абсолютною температурою*:

$$T, K = t, ^\circ\text{C} + 273,15. \quad (1.5)$$

Тестові завдання

1 Який тиск вимірює манометр?

- а) абсолютний;
- б) надлишковий;
- в) барометричний.

2 Який тиск вимірює вакуумметр?

- а) абсолютний;
- б) надлишковий;
- в) барометричний.

3 Як обчислюється абсолютний тиск?

V1) $P = B + P_{\text{надл.}}$;

V2) $P = B - P_{\text{надл.}}$;

V3) $P = P_{\text{надл.}} - B$.

4 Виберіть правильне співвідношення між одиницями виміру тиску:

а) $1 \text{ бар} = 10^6 \text{ Па}$;

б) $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$;

в) $1 \text{ бар} = 760 \text{ мм.рт.ст}$;

г) $1 \text{ бар} = 750 \text{ мм.рт.ст}$.

5 Яка термодинамічна система називається ізольованою?

- а) яка не обмінюється речовиною з навколишнім середовищем;
- б) яка не обмінюється енергією з навколишнім середовищем;
- в) яка не обмінюється з навколишнім середовищем ні речовиною, ні енергією.

6 Яка термодинамічна система називається закритою?

- а) яка не обмінюється речовиною з навколишнім середовищем;
- б) яка не обмінюється енергією з навколишнім середовищем;
- в) яка не обмінюється з навколишнім середовищем ні речовиною, ні енергією.

7 Яка термодинамічна система називається адіабатною?

- а) яка не обмінюється речовиною з навколишнім середовищем;
- б) яка не обмінюється енергією з навколишнім середовищем;
- в) яка не обмінюється з навколишнім середовищем ні речовиною, ні енергією.

8 Які процеси протікають у реальній природі?

- а) необоротні;
- б) оборотні;
- в) оборотні й необоротні.

9 Які речовини найчастіше використовуються в технічній термодинаміці як робочі тіла?

- а) тверді речовини;
- б) рідини;
- в) гази;
- г) пари.

10 Що таке нормальні фізичні умови?

- а) $p = 735$ мм рт. ст.; $t = 0$ °С;
- б) $p = 750$ мм рт. ст.; $t = 0$ °С;
- в) $p = 760$ мм рт. ст.; $T = 273$ К;
- г) $p = 1$ бар; $T = 273$ К.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Тиск повітря за ртутним барометром дорівнює 770 мм при температурі 0 °С. Потрібно навести цей тиск у ньютонах на квадратний метр та барах.

Завдання 2. Наведіть тиск, що дорівнює 6,89 бар, у ньютонах на квадратний метр, у кілограмах на квадратний метр, в кГ/см², у міліметрах ртутного стовпчика і в міліметрах ртутного стовпчика.

Завдання 3. Тиск повітря за показаннями ртутного барометра складає 765 мм при температурі ртуті 20 °С. Потрібно привести показання приладу до 0 °С та подати цей тиск у барах.

Завдання 4. Визначити абсолютний тиск пари, якщо манометр показує 1,3 бар, а атмосферний тиск за ртутним барометром складає $B = 680$ мм при температурі 25 °С.

Завдання 5. Тиск у паровому котлі 0,4 бар при барометричному тиску $B_1 = 730$ мм рт.ст. Якому значенню дорівнюватиме надлишковий тиск у котлі, якщо показання

барометра підвищуються до $V_2 = 790$ мм рт.ст., а стан пари в котлі залишиться тим же. Барометричний тиск приведений до 0°C .

Завдання 6. Визначити абсолютний тиск у конденсаторі парової турбіни, якщо показання ртутного вакуумметра, що приєднаний до нього, складають 705 мм рт.ст., показання ртутного барометра, що приведене до 0°C , дорівнюють 747 мм. Температура повітря в місці установлення приладів 20°C .

Завдання 7. У трубці вакуумметра висота стовпчика ртуті складає 570 мм при температурі ртуті 20°C . Над ртуттю знаходиться стовпчик води висотою 35 мм. Барометричний тиск повітря 728 мм рт.ст. при 15°C .

Визначити абсолютний тиск у посудині.

Завдання 8. Прилад показує розрідження 45 мм вод. ст. Атмосферний тиск за ртутним барометром 757 мм при 15°C .

Визначити абсолютний тиск димових газів.

ТЕМА 2. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Ідеальний газ – газ, у якому відсутні сили взаємного тяжіння і відштовхування між молекулами, а об'єм самих молекул малий у порівнянні з об'ємом газу.

Рівняння стану ідеального газу зв'язує між собою основні параметри стану:

$$pV = mRT ; \quad (2.1)$$

$$pv = RT ; \quad (2.2)$$

$$p v_\mu = R_\mu T , \quad (2.3)$$

де p – тиск газу, Па;

V – об'єм газу, м^3 ;

M – маса газу, кг;

v – питомий об'єм газу, $\text{м}^3/\text{кг}$;

V_μ – об'єм 1 кмоль газу, $\text{м}^3/\text{кмоль}$;

R – газова стала для 1 кг газу, Дж/(кг К);

μR – універсальна газова стала для 1 кмоль газу, Дж/(кмоль К).

Газова стала, віднесена до 1 кг газу:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \quad (2.4)$$

де μ – молекулярна маса, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ (додаток А).

За допомогою даного рівняння для двох різних станів деякого газу можна отримати вираз для визначення будь-якого параметра при переході від одного стану до іншого, якщо значення інших параметрів відомі:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}; \quad (2.5)$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (2.6)$$

Рівняння (2.4) може бути подана таким чином:

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2}, \quad (2.7)$$

бо $\rho = 1/v$, (2.8)

отже, $\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$. (2.9)

Таким чином, рівняння (2.9) дозволяє визначити густину газу ρ , кг/м^3 , при будь-яких умовах, якщо її значення відоме для певних умов.

Тестові завдання

1 Як записується рівняння стану ідеального газу для 1 кмоль газу?

- а) $pV = RT$;
- б) $pV = mRT$;
- в) $p \nu_{\mu} = R_{\mu} T$.

2 Як записується рівняння стану ідеального газу для 1 кг газу?

- а) $pV = RT$;
- в) $pV = mRT$;
- с) $p \nu_{\mu} = R_{\mu} T$.

3 Чому дорівнює газова постійна для конкретного газу?

- а) $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;
- б) $R = \frac{8314}{\mu} \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;
- в) $R = (8314 \cdot \mu) \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

4 Чому дорівнює універсальна газова постійна?

- а) $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;
- б) $R = \frac{8314}{\mu} \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;
- в) $R = (8314 \cdot \mu) \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

5 Які процеси можна зобразити графічно в термодинамічних діаграмах?

- а) оборотні;
- б) необоротні;
- в) рівноважні;
- г) нерівноважні.

6 Які стани термодинамічної системи описує рівняння стану ідеального газу?

- а) рівноважні;
- б) нерівноважні;

в) рівноважні й нерівноважні.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Визначити густину CO при тиску $p = 1$ бар і температурі $t = 15$ °С.

Завдання 2. Визначити густину і питомий об'єм двоокису вуглецю CO_2 при нормальних умовах.

Завдання 3. Визначити масу CO_2 в ємності об'ємом $V = 4$ м³ при температурі $t = 90$ °С. Тиск газу за манометром дорівнює 0,4 бар. Барометричний тиск $B = 780$ мм рт.ст. при 0 °С.

Завдання 4. Визначити масу 5 м³ водню, 5 м³ кисню, 5 м³ вуглекислого газу при тиску $p = 6$ бар і температурі $t = 100$ °С.

Завдання 5. При якій температурі густина азоту при тиску 1,5 МН/м² буде дорівнювати 3 кг/м³.

Завдання 6. Балон з киснем ємністю 20 л знаходиться під тиском 10 МН/м² при 15 °С. Після витрати частини кисню тиск знизився до 7,6 МН/м², а температура зменшилася до 10 °С.

Визначити масу витраченого кисню.

Завдання 7. Маса пустого балона для кисню ємністю 50 л дорівнює 80 кг.

Визначити масу балона після заповнення його киснем при температурі $t = 20$ °С до тиску 100 бар.

Завдання 8. Ємність об'ємом 4,2 м³ заповнена 15 кг оксиду вуглецю.

Визначити тиск в ємності, якщо температура газу в ємності складає $t = 27$ °С.

Завдання 9. Повітря, що міститься в балоні ємністю 0,9 м³, витікає в атмосферу. Температура його на початку становила 27 °С.

Визначити масу повітря, яка була витрачена, якщо початковий тиск у балоні складав 93,2 бар, а після випуску – 42,2 бар. Температура повітря при цьому знизилася до 17 °С.

Завдання 10. Компресор подає стиснене повітря в резервуар, при цьому за час роботи компресора тиск у резервуарі підвищується від атмосферного до 7 бар, а температура змінюється

від 20 до 25 °С. Об'єм резервуара $V = 56 \text{ м}^3$. Барометричний тиск, що приведений до 0 °С, складає 750 мм рт. ст.

Визначити масу повітря, що була подана компресором до резервуару.

ТЕМА 3. ГАЗОВІ СУМІШІ

Газова суміш – суміш окремих газів, які не вступають між собою в хімічні реакції; кожен з газів у суміші повністю зберігає свої властивості і поводить себе так, якби він один займав об'єм суміші.

Масова частка:

$$g_1 = \frac{M_1}{M}; g_2 = \frac{M_2}{M}; \dots; g_n = \frac{M_n}{M}, \quad (3.1)$$

де g_1, g_2, \dots, g_n – масові частки компонентів;

M_1, M_2, \dots, M_n – маса окремих газів, кг;

M – маса газової суміші, кг.

Об'ємна частка:

$$r_1 = \frac{V_1}{V}; r_2 = \frac{V_2}{V}; \dots; r_n = \frac{V_n}{V}, \quad (3.2)$$

де r_1, r_2, \dots, r_n – об'ємні частки компонентів;

V_1, V_2, \dots, V_n – парціальні об'єми окремих газів, м^3 ;

V – об'єм газової суміші, м^3 .

Закон Амага має вигляд:

$$V_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n V_i = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad (3.3)$$

Співвідношення між масовими й об'ємними частками:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}, \quad (3.4)$$

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}, \quad (3.5)$$

де μ_i – молекулярна маса компонента газової суміші, $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$.

Густина газової суміші ρ_{CM} , кг/м^3 :

$$\rho_{CM} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i, \quad (3.6)$$

$$\rho_{CM} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}. \quad (3.7)$$

Питомий об'єм газової суміші ν_{CM} , $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$\nu_{CM} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n r_i \rho_i}, \quad (3.8)$$

$$\nu_{CM} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}. \quad (3.9)$$

Закон Дальтона має вигляд:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (3.10)$$

де p_1, p_2, \dots, p_n – парціальний тиск компонента суміші, Па.

Парціальні тиски компонентів газової суміші:

$$p_i = pr_i, \quad (3.11)$$

$$p_i = g_i \frac{R_i}{R_{CM}} p, \quad (3.12)$$

де p – тиск газової суміші, Па;

R_i – газова стала компонента суміші, $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$;

R_{CM} – газова стала суміші газів, $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$.

Уявна молекулярна маса μ_{CM} , $\frac{\text{кг}}{\text{к моль}}$:

$$\mu_{CM} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i, \quad (3.13)$$

$$\mu_{CM} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}. \quad (3.14)$$

Газова стала суміші газів R_{CM} , $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$:

$$R_{CM} = \sum_{i=1}^n g_i R_i, \quad (3.15)$$

$$R_{CM} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i} = \frac{8314}{\mu_{CM}}. \quad (3.16)$$

Тестові завдання

1 Як визначити уявну молекулярну масу суміші μ_{CM} , якщо суміш задана масовими частками?

а) $\mu_{CM} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}};$

б) $\mu_{CM} = \sum r_i \mu_i ;$

в) $\mu_{CM} = \sum g_i \mu_i.$

2 Як визначити уявну молекулярну масу суміші $\mu_{см}$, якщо суміш задана масовими частками?

а)
$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}}$$

б)
$$\mu_{см} = \sum r_i \mu_i ;$$

в)
$$\mu_{см} = \sum g_i \mu_i .$$

3 Як визначити газову постійну суміші, якщо суміш задана масовими частками?

а)
$$R_{см} = \sum g_i R_i ;$$

б)
$$R_{см} = \frac{8314}{\sum r_i R_i} ;$$

в)
$$R_{см} = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{R_i}} .$$

4 Як визначити газову постійну суміші, якщо суміш задана об'ємними частками?

А)
$$R_{см} = \sum g_i R_i ;$$

В)
$$R_{см} = \frac{8314}{\sum r_i R_i} ;$$

С)
$$R_{см} = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{R_i}} .$$

5 Як записується закон Дальтона для суміші газів?

а)
$$P_{см} = \sum P_i ;$$

б)
$$P_{см} = \sum r_i P_i ;$$

в)
$$P_{см} = \sum g_i P_i .$$

6 Як записується закон Амага для суміші газів?

- а) $V_{см} = \sum V_i$;
 б) $V_{см} = \sum r_i V_i$;
 в) $V_{см} = \sum g_i V_i$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Атмосферне повітря має такий масовий склад:
 $g_{O_2} = 23,2\%$; $g_{N_2} = 76,8\%$.

Визначити об'ємний склад повітря, його газову сталу, уявну молекулярну масу, парціальні тиски кисню та азоту, якщо тиск повітря за барометром $B = 760$ мм рт. ст.

Завдання 2. Об'ємний склад сухих продуктів згорання палива такий: $r_{CO_2} = 12,3\%$, $r_{O_2} = 7,2\%$, $r_{N_2} = 80,5\%$.

Знайти уявну молекулярну масу, газову постійну, а також густину і питомий об'єм продуктів згорання, якщо тиск складає 750 мм рт. ст., а температура дорівнює 800 °С.

Завдання 3. Генераторний газ має такий об'ємний склад:
 $r_{CO_2} = 4,8\%$, $r_{CO} = 27,6\%$, $r_{N_2} = 58,6\%$, $r_{CH_4} = 2\%$, $r_{H_2} = 7\%$.

Визначити масові частки, уявну молекулярну масу, газову сталу, густину і парціальні тиски при 15 °С і $0,1$ МН/м².

Завдання 4. Масовий склад суміші такий:
 $g_{O_2} = 12\%$; $g_{CO_2} = 18\%$; $g_{N_2} = 70\%$.

До якого тиску потрібно стиснути таку суміш, яка знаходиться при нормальних умовах, щоб при температурі 18 °С 8 кг її займали об'єм 4 м³?

Завдання 5. Аналіз продуктів згорання палива показав такий їх склад: $r_{CO_2} = 12,2\%$, $r_{CO} = 0,4\%$, $r_{N_2} = 80,3\%$, $r_{CH_4} = 2\%$, $r_{O_2} = 7,1\%$.

Визначити масовий склад газів, що входять до суміші.

Завдання 6. Визначити масовий склад газової суміші, яка містить вуглекислий газ і азот, якщо парціальний тиск вуглекислого газу дорівнює $1,2$ бар, тиск суміші складає 3 бар.

Завдання 7. Визначити газову сталу, питомий об'єм газової суміші, густину і парціальні тиски її складових, якщо об'ємний склад суміші такий:

$r_{CO_2} = 12\%$, $r_{CO} = 1\%$, $r_{N_2} = 74\%$, $r_{H_2O} = 6\%$, $r_{O_2} = 7\%$.

ТЕМА 4. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ ГАЗІВ

Теплоємність – кількість теплоти, яку необхідно підвести до тіла (газу), щоб змінити температуру будь-якої кількісної одиниці на 1°C (1 K).

У залежності від кількісної одиниці речовини розрізняють *масову* теплоємність C , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, *об'ємну* теплоємність C' , $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{K})$ і *кіломольну* теплоємність μC , $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$.

Масова, кіломольна та об'ємна теплоємності пов'язані між собою залежностями:

$$C = \frac{\mu C}{\mu}; \quad (4.1)$$

$$C' = \frac{\mu C}{22,4}, \quad (4.2)$$

де $22,4$ – об'єм кіломоля ідеального газу при нормальних фізичних умовах, $\text{м}^3/\text{кмоль}$;

Теплоємність ідеальних газів залежить від атомності, характеру процесу і температури.

Розрізняють середню і дійсну теплоємності. *Середня* теплоємність в інтервалі температур $(t_1 - t_2)$ дорівнює:

$$C_{m t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_1 - t_2}, \quad (4.3)$$

де $q_1 - q_2$ – кількість теплоти, підведеної в даному процесі, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 t_1, t_2 – температура на початку і в кінці процесу, $^{\circ}\text{C}$.

Якщо вираз (4.3) записати для нескінченно малої кількості теплоти dq й інтервалу температур dt , то одержимо формулу так званої *дійсної* теплоємності C при даній температурі t :

$$C = \frac{dq}{dt}. \quad (4.4)$$

З виразу (4.4) $dq = Cdt$, а для всього процесу 1–2 кількість теплоти q_{1-2} :

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt. \quad (4.5)$$

Таку ж кількість теплоти можна виразити через середню теплоємність:

$$q_{1-2} = C_{m_1}^{t_2} (t_1 - t_2), \quad (4.6)$$

$$q_{1-2} = C_{m_0}^{t_2} t_2 - C_{m_0}^{t_1} t_1. \quad (4.7)$$

У деяких випадках необхідно за допомогою таблиць середніх теплоємностей $C_{m_0}^t$ визначити значення теплоємності $C_{m_1}^{t_2}$. Для цього використовують формулу

$$C_{m_1}^{t_2} = \frac{C_{m_0}^{t_2} t_2 - C_{m_0}^{t_1} t_1}{t_1 - t_2}. \quad (4.8)$$

У теплотехніці особливе значення мають два випадки нагрівання (охолодження): при постійному тиску (ізобарний процес) і при постійному об'ємі (ізохорний процес). Обом цим випадкам відповідають *ізобарні та ізохорні* теплоємності, що мають у позначеннях індекси «р» «v».

Ізобарні теплоємності: $C_p, C_p', \mu C_p, C_{pm_1}^{t_2}, C_{pm_0}^{t_1}$. *Ізохорні* теплоємності: $C_v, C_v', \mu C_v, C_{vm_1}^{t_2}, C_{vm_0}^{t_1}$.

Для ідеальних газів зв'язок між ізобарною та ізохорною теплоємностями встановлюється рівняннями Майєра:

$$C_p - C_v = R, \quad \mu C_p - \mu C_v = \mu R = 8314 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}. \quad (4.9)$$

Відношення теплоємностей при постійному тиску і постійному об'ємі позначається K і має назву *показник адиабати*:

$$K = \frac{\mu C_p}{\mu C_v} = \frac{C_p}{C_v}. \quad (4.10)$$

Теплоємності газових сумішей визначають за формулами:

$$C_{CM} = \sum_{i=1}^n g_i C_i, \quad (4.11)$$

$$C'_{CM} = \sum_{i=1}^n r_i C_i, \quad (4.12)$$

$$\mu C_{CM} = \sum_{i=1}^n r_i \mu C_i, \quad (4.13)$$

де $C_i, C'_i, \mu C_i$ – відповідно масова, об'ємна і кіломольна теплоємності i -го компонента
 $C_{CM}, C'_{CM}, \mu C_{CM}$ – відповідно масова, об'ємна і кіломольна теплоємності газової суміші.

Внутрішня енергія – функція стану закритої термодинамічної системи, визначувана тим, що її приріст у будь-якому процесі, що відбувається в цій системі, дорівнює сумі теплот, наданих системі, і роботи, здійсненої над нею. Якщо робоче тіло - ідеальний газ, то внутрішня енергія залежить тільки від температури.

Для процесу ідеального газу зміна внутрішньої енергії Δu_{1-2} дорівнює:

$$\Delta u_{1-2} = C_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1). \quad (4.14)$$

За умови, що $C_v = \text{const}$:

$$\Delta u_{1-2} = C_v (t_2 - t_1). \quad (4.15)$$

Ентальпія - функція стану термодинамічної системи, рівна сумі внутрішньої енергії і добутку питомого об'єму на тиск:

$$h = u + pv. \quad (4.16)$$

Ентальпія ідеального газу залежить тільки від температури. Зміна ентальпії в процесі ідеального газу підраховується за формулою:

$$\Delta h_{1-2} = C_{t1\ pm}^{t2} (t_2 - t_1). \quad (4.17)$$

За умови, що $C_v = \text{const}$:

$$\Delta h_{1-2} = C_p (t_2 - t_1). \quad (4.18)$$

Перший закон термодинаміки є законом збереження енергії, застосований до процесів, що протікають у термодинамічних системах. Цей закон можна сформулювати так: енергія ізольованої термодинамічної системи залишається незмінною незалежно від того, які процеси в ній протікають. Для незамкнутого термодинамічного процесу 1-2, що протікає в простій ізольованій системі теплоти, яка складається з джерела, робочого тіла та об'єкта роботи рівняння балансу енергії набуде вигляду:

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2}, \quad (4.19)$$

де q_{1-2} – кількість теплоти, що підводиться в процесі 1-2 до 1 кг робочого тіла;

$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1$ – зміна внутрішньої енергії 1 кг робочого тіла в процесі 1-2;

l_{1-2} – робота зміни об'єму 1 кг робочого тіла в процесі 1-2.

Рівняння (4.19) називають математичним (аналітичним) виразом першого закону термодинаміки. Це рівняння можна записати і в диференціальній формі, відповідній елементарній ділянці процесу:

$$dq = du + dl = du + pdv. \quad (4.20)$$

Ентропія – функція стану термодинамічної системи, визначувана тим, що її диференціал ds при елементарному рівноважному (оборотному) процесі рівний відношенню нескінченно малої кількості теплоти dQ , наданій системі, до термодинамічної температури T системи:

$$ds = \frac{dQ}{T}. \quad (4.21)$$

Якщо $dQ > 0$ (теплота підводиться), то $dS > 0$ (ентропія зростає). При відведенні теплоти від термодинамічної системи ($dQ < 0$) ентропія складає ($dS < 0$). З виразу (4.21) випливає:

$$dQ = Tds, \quad (4.22)$$

$$Q_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} Tds. \quad (4.23)$$

Тестові завдання

1 Як записується I закон термодинаміки в диференціальній формі?

- а) $dq = du + pdv$;
- б) $dq = dh - vdp$;
- в) $dq = du + TdS$.

2 Від яких параметрів залежить зміна внутрішньої енергії ідеального газу?

- а) від тиску;
- б) від щільності;
- в) від температури.

3 Від яких параметрів залежить зміна ентальпії ідеального газу?

- а) від тиску;
- б) від щільності;
- в) від температури.

4 Які термодинамічні величини залежать від характеру кривої процесу?

- а) Δu ;
- б) Δh ;
- в) q ;
- г) l .

5 Які термодинамічні величини не залежать від характеру кривої процесу?

- а) Δu ;
- б) Δh ;
- в) q ;
- г) l .

6 Як визначається ентальпія?

- а) $h = u - pv$;
- б) $h = pv - u$;
- в) $h = u + pv$.

7 Як графічно зображується робота?

- а) площа під кривою процесу в T-S координатах;
- б) площа під кривою процесу в p-v координатах;
- в) площа під кривою процесу в h-S координатах.

8 Як графічно зображується кількість підведеної або відведеної теплоти в процесі?

- а) площа під кривою процесу в T-S координатах;
- б) площа під кривою процесу в p-v координатах;
- в) площа під кривою процесу в h-S координатах.

9 Як співвідносяться ізобарна C_p й ізохорна C_v теплоємності для одного робочого тіла?

- а) $C_p > C_v$;
- б) $C_v > C_p$;
- в) $C_p = C_v$.

10 Як визначити збільшення внутрішньої енергії dU ?

- а) $dU = C_v \cdot dT$;
- б) $dU = C_p \cdot dT$;

в) $dU = \mu C_v \cdot dT$.

11 Як записується рівняння Майєра?

а) $C_v - C_p = R$;

б) $C_p - C_v = R$;

в) $\mu C_p - \mu C_v = \mu R$.

12 Як визначається показник адіабати?

а) $k = \frac{C_v}{C_p}$;

б) $k = \frac{C_p}{C_v}$;

в) $k = \frac{\mu C_v}{\mu C_p}$;

г) $k = \frac{\mu C_p}{\mu C_v}$.

13 Як визначити збільшення ентальпії?

а) $dh = c_v \cdot dT$;

б) $dh = c_p \cdot dT$;

в) $dh = \mu c_v \cdot dT$;

г) $dh = \mu c_p \cdot dT$.

14 Як змінюється теплоємність з ростом температури?

а) зростає;

б) зменшується;

в) залишається незмінною.

15 Як визначити теплоємність суміші, якщо суміш задана масовими частками?

а) $c_{см} = \sum c_i g_i$;

б) $c_{см} = \sum c'_i r_i$;

в) $c_{см} = \sum c'_i g_i$.

16 Як визначити теплоємність суміші, якщо суміш задана масовими частками?

- а) $c_{cm} = \sum c_i g_i$;
 б) $c_{cm} = \sum c'_i r_i$;
 в) $c_{cm} = \sum c'_i g_i$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Визначити значення об'ємної та масової теплоємності кисню при постійному об'ємі і постійному тиску, вважаючи $c = \text{const}$.

Завдання 2. Розрахувати середню масову і середню об'ємну теплоємність оксиду вуглецю при постійному об'ємі для інтервалу температур $0 \div 1200$ °С, якщо відомо, що $(\mu_{cm})_0^{1200}$ для оксиду вуглецю дорівнює 32,192 кДж/(кмоль К). Порівняти отримані результати з табличними даними.

Завдання 3. Визначити середню теплоємність для повітря при постійному тиску в межах $200 \div 800$ °С, вважаючи залежність теплоємності від температури нелінійною.

Завдання 4. Визначити середню масову теплоємність при постійному тиску для кисню в інтервалі $350 \div 1000$ °С, вважаючи залежність теплоємності від температури нелінійною.

Завдання 5. Азот кількістю 6 м^3 при тиску $p_1 = 3$ бар і температурі $t_1 = 25$ °С при постійному тиску нагрівається до температури $t_2 = 130$ °С.

Визначити кількість підведеної до азоту теплоти при $c = \text{const}$. Для двохатомних газів $\mu_{cm} = 29,31$ кДж/(кмоль·К).

Завдання 6. У закритій ємності об'ємом $V = 300$ л знаходиться кисень при тиску 8 бар і температурі $t_1 = 20$ °С.

Яку кількість теплоти необхідно підвести для того, щоб температура збільшилася до 120 °С. Розрахувати для двох випадків: 1) при $c = \text{const}$; 2) при нелінійній залежності теплоємності від температури.

Завдання 7. В ємності об'ємом 300 л знаходиться кисень при $p_1 = 2$ бар і температурі $t_1 = 20$ °С. Яку кількість теплоти необхідно підвести, щоб температура кисню підвищилася до $t_2 = 300$ °С? Який тиск встановиться при цьому? Залежність теплоємності від температури вважати нелінійною.

Завдання 8. Знайти кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 м^3 (при нормальних умовах) від 200 до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ газової суміші такого складу:

$$r_{\text{CO}_2} = 14,5\%, r_{\text{N}_2} = 79\%, r_{\text{CH}_4} = 2\%, r_{\text{O}_2} = 6,5\%.$$

Процес відбувається при постійному тиску і нелінійній залежності теплоємності від температури.

Завдання 9. У котельній електричної станції за 20 год роботи спалено 62 т кам'яного вугілля, що має теплоту згорання 28900 кДж/кг .

Визначити середню потужність станції, якщо в електричну енергію перетворено 18% теплоти, отриманої при згоранні вугілля.

Завдання 10. Паросилова установка потужністю 4200 кВт має ККД $\eta = 0,2$.

Визначити годинну витрату палива, якщо його теплота згорання дорівнює 25000 кДж/кг .

ТЕМА 5. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Ізохорний процес відбувається при постійному об'ємі ($dv = 0$, або $v = \text{const}$). Крива процесу – ізохора.

Параметри стану в ізохорному процесі пов'язані таким рівнянням:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (5.1)$$

Кількість теплоти ізохорного процесу для 1 кг газу при постійній теплоємності:

$$q_v = C_v(t_2 - t_1) = u_2 - u_1. \quad (5.2)$$

Кількість теплоти ізохорного процесу для 1 кг газу при змінній теплоємності:

$$q_v = C_{vm0}^{t2} t_2 - C_{vm0}^{t1} t_1 = u_2 - u_1. \quad (5.3)$$

Зовнішня робота газу при $v = \text{const}$ дорівнює нулю: $l = 0$.

Зміна ентропії при $v = \text{const}$ за умови, що теплоємність постійна:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = C_v \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (5.4)$$

Ізобарний процес відбувається при постійному тиску ($dp = 0$, або $p = \text{const}$). Крива процесу – ізобара.

Параметри стану в ізобарному процесі пов'язані таким рівнянням:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (5.5)$$

Кількість теплоти ізобарного процесу для 1 кг газу при постійній теплоємності:

$$q_p = C_p(t_2 - t_1) = i_2 - i_1. \quad (5.6)$$

Кількість теплоти ізобарного процесу для 1 кг газу при змінній теплоємності:

$$q_p = C_{pm0}^{t2} t_2 - C_{pm0}^{t1} t_1 = i_2 - i_1. \quad (5.7)$$

Для M , кг, газу або V_H , м³, газу кількість теплоти:

$$q_p = MC_{pm}(t_2 - t_1) = V_H C'_{pm}(t_2 - t_1). \quad (5.8)$$

Питома робота для 1 кг газу при $p = \text{const}$:

$$l = p(v_2 - v_1); \quad (5.9)$$

$$l = R(T_2 - T_1). \quad (5.10)$$

Робота для M кг газу при $p = \text{const}$:

$$L = Mp(v_2 - v_1) = p(V_2 - V_1); \quad (5.11)$$

$$L = MR(T_2 - T_1). \quad (5.12)$$

Зміна ентропії при $p = \text{const}$ за умови, що теплоємність постійна:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = C_p \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (5.13)$$

Ізотермічний процес – процес, який відбувається при постійній температурі ($dT = 0$, або $T = \text{const}$). Крива процесу – ізотерма.

Параметри стану в ізотермічному процесі пов'язані таким рівнянням:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}; \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (5.14)$$

Питома робота для 1 кг газу при $T = \text{const}$:

$$l = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (5.15)$$

$$l = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (5.16)$$

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (5.17)$$

$$l = RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (5.18)$$

Робота для M , кг, газу при $T = \text{const}$:

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (5.19)$$

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (5.20)$$

В ізотермічному процесі робота зміни об'єму і кількість теплоти рівні між собою: $Q = L$.

Зміна ентропії при $T = \text{const}$ за умови, що теплоємність постійна:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (5.21)$$

Адіабатний процес відбувається без підведення і відведення теплоти, тобто за умови відсутності теплообміну з навколишнім середовищем ($dq = 0$, або $q = \text{const}$). Крива процесу – адіабата. Рівняння адіабати має вигляд:

$$pv^k = \text{const}, \quad (5.22)$$

де k – показник адіабати.

Параметри стану в адіабатному процесі пов'язані такими рівняннями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k; \quad (5.23)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}; \quad (5.24)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \quad (5.25)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5.26)$$

Кількість теплоти адіабатного процесу дорівнює нулю.

Питома робота адіабатного процесу для 1 кг газу при постійній теплоємності:

$$l = C_{vm}(t_2 - t_1) = u_2 - u_1. \quad (5.27)$$

Питома робота адіабатного процесу для 1 кг газу при змінній теплоємності:

$$l = C_{vm0}^{t_2} t_2 - C_{vm0}^{t_1} t_1 = u_2 - u_1. \quad (5.28)$$

Питома робота для 1 кг газу при $q = \text{const}$:

$$l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2); \quad (5.29)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right); \quad (5.30)$$

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2); \quad (5.31)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right). \quad (5.32)$$

Робота для M кг газу при $q = \text{const}$:

$$L = \frac{1}{k-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2); \quad (5.33)$$

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right); \quad (5.34)$$

$$L = \frac{MR}{k-1} (T_1 - T_2); \quad (5.35)$$

$$L = \frac{p_1 V_1}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right). \quad (5.36)$$

Політронний процес – будь-який процес ідеального газу, в якому теплоємність є постійною величиною. Крива процесу – політропа.

Рівняння політропи має вигляд:

$$pv^m = \text{const}, \quad (5.37)$$

де m – показник політропи.

Параметри стану в політропному процесі пов'язані такими рівняннями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^m; \quad (5.38)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{m-1}; \quad (5.39)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}. \quad (5.40)$$

Показник політропи m дорівнює:

$$m = \frac{C_n - C_p}{C_n - C_v}, \quad (5.41)$$

де C_n – теплоємність у політропному процесі.

З виразу (5.41) можна отримати рівняння для визначення теплоємності політропного процесу:

$$C_n = C_v \frac{m - k}{m - 1}. \quad (5.42)$$

З рівняння (5.42) можна визначити теплоємності політропного процесу для кожного значення m :

- ізохорного процесу $m = \pm\infty$, $C_n = C_v$;
- ізобарного процесу $m = 0$, $C_n = kC_v = C_p$;
- ізотермічного процесу $m = 1$, $C_n = \pm\infty$;
- адіабатного процесу $m = k$, $C_n = 0$.

Питома робота для 1 кг газу в політропному процесі :

$$l = \frac{1}{m-1}(p_1v_1 - p_2v_2); \quad (5.43)$$

$$l = \frac{p_1v_1}{m-1} \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{m-1}\right); \quad (5.44)$$

$$l = \frac{R}{m-1}(T_1 - T_2); \quad (5.45)$$

$$l = \frac{p_1v_1}{m-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}\right); \quad (5.46)$$

$$l = \frac{k-1}{k-m}q. \quad (5.47)$$

Робота для M, кг, газу:

$$L = \frac{1}{m-1}(p_1V_1 - p_2V_2); \quad (5.48)$$

$$L = \frac{p_1V_1}{m-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{m-1}\right); \quad (5.49)$$

$$L = \frac{MR}{m-1}(T_1 - T_2); \quad (5.50)$$

$$L = \frac{p_1V_1}{m-1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}\right); \quad (5.51)$$

$$L = \frac{k-1}{k-m}Q. \quad (5.52)$$

Зміна внутрішньої енергії та теплота в політропному процесі:

$$\Delta u = C_{vm}(t_2 - t_1); \quad (5.53)$$

$$\Delta u = \frac{m-1}{1-k}l; \quad (5.54)$$

$$q = C_n(t_2 - t_1) = C_v \frac{m-k}{m-1}(t_2 - t_1); \quad (5.55)$$

$$Q = MC_n(t_2 - t_1) = MC_v \frac{m-k}{m-1}(t_2 - t_1). \quad (5.56)$$

Зміна ентальпії в політропному процесі:

$$\Delta i = i_2 - i_1 = C_p(t_2 - t_1). \quad (5.57)$$

Значення m в будь-якому політропному процесі може бути визначено, якщо відомі значення двох параметрів у початковому і кінцевому стані:

$$m = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{v_2}{v_1}}; \quad (5.58)$$

$$m-1 = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{v_1}{v_2}}; \quad (5.59)$$

$$\frac{m-1}{m} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{p_2}{p_1}}. \quad (5.60)$$

Зміна ентропії газу в політропному процесі:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = C_v \left[\frac{(m-k)}{(m-1)} \right] \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.61)$$

Тестові завдання

1 Як визначається ізобарний процес?

- а) $v = \text{const}$;
- б) $p = \text{const}$;

в) $T = \text{const}$.

2 Як визначається ізотермічний процес?

а) $v = \text{const}$;

б) $p = \text{const}$;

в) $T = \text{const}$.

3 Як визначається адіабатний процес?

а) $S = \text{const}$;

б) $c = \text{const}$;

в) $dq = 0$.

4 Як визначається політропний процес?

а) $S = \text{const}$;

б) $c = \text{const}$;

в) $dq = \text{const}$.

5 Як записується рівняння адіабатного процесу?

а) $p v = \text{const}$;

б) $p v^k = \text{const}$;

в) $p v^n = \text{const}$.

6 Як записується рівняння політропного процесу?

а) $p v = \text{const}$;

б) $p v^k = \text{const}$;

в) $p v^m = \text{const}$.

7 Як записується рівняння ізотермічного процесу?

а) $p v = \text{const}$;

б) $p v^k = \text{const}$;

в) $p v^m = \text{const}$.

8 Як можна обчислити роботу зміни об'єму в ізобарному процесі?

а) $l = p (v_2 - v_1)$;

б) $l = R (T_2 - T_1)$;

$$\text{в) } l = p \nu \cdot \ln \frac{p_1}{p_2};$$

$$\text{г) } l = R T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

9 Як можна обчислити роботу зміни об'єму в ізотермічному процесі?

$$\text{а) } l = p (v_2 - v_1);$$

$$\text{б) } l = R (T_2 - T_1);$$

$$\text{в) } l = p \nu \cdot \ln \frac{p_1}{p_2};$$

$$\text{г) } l = R T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

10 Як можна обчислити кількість підведеної або відведеної теплоти в ізохорному процесі?

$$\text{а) } q = c_v (T_2 - T_1);$$

$$\text{б) } q = h_2 - h_1;$$

$$\text{в) } q = T (s_2 - s_1).$$

11 Як можна обчислити кількість підведеної або відведеної теплоти в ізобарному процесі?

$$\text{а) } q = c_p (T_2 - T_1);$$

$$\text{б) } q = h_2 - h_1;$$

$$\text{в) } q = T (s_2 - s_1).$$

12 Як можна обчислити кількість підведеної або відведеної теплоти в ізотермічному процесі?

$$\text{а) } q = c_v(T_2 - T_1);$$

$$\text{б) } q = h_2 - h_1;$$

$$\text{в) } q = T (s_2 - s_1).$$

13 Виберіть правильне співвідношення між початковими й кінцевими параметрами адіабатного процесу.

$$\text{а) } \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k ;$$

$$\text{б) } \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k ;$$

$$\text{в) } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} ;$$

$$\text{г) } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} .$$

14 Виберіть правильне співвідношення між початковими й кінцевими параметрами політропного процесу.

$$\text{а) } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{m-1} ;$$

$$\text{б) } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{m-1} ;$$

$$\text{в) } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{m-1}{m}} ;$$

$$\text{г) } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}.$$

15 За якою формулою обчислюється робота адіабатного процесу?

$$\text{а) } l = \frac{1}{k-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1);$$

$$\text{б) } l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2);$$

$$\text{в) } l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right];$$

$$\text{г) } l = \frac{R T_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{k-1} \right].$$

16 Чому дорівнює показник політропи в ізохорному процесі?

а) 0;

б) 1;

в) ∞ ;

г) -1.

17 Чому дорівнює показник політропи в ізобарному процесі?

а) 0;

б) 1;

в) ∞ ;

г) -1.

18 Чому дорівнює показник політропи в ізотермічному процесі?

а) 0;

- б) 1;
- в) ∞ ;
- г) -1.

19 Чому дорівнює в загальному випадку показник політропи?

- а) $m = \frac{c_p}{\nu_p}$;
- б) $m = \frac{c - c_p}{c - c_v}$;
- в) $m = \frac{c - c_v}{c - c_p}$;
- г) $m = \frac{c_v}{c_p}$.

20 Як обчислюється кількість підведеного або відведеного тепла в політропному процесі?

- а) $q = c_v \frac{m - k}{m - 1} (T_2 - T_1)$;
- б) $q = c_p \frac{m - k}{m - 1} (T_2 - T_1)$;
- в) $q = c_v \frac{m - 1}{m - k} (T_2 - T_1)$.
- г) $q = c_p \frac{m - 1}{m - k} (T_2 - T_1)$.

21 Де розташовані процеси з підведенням теплоти на p - v -діаграмі?

- а) нижче адіабати;
- б) вище адіабати;
- в) нижче ізотерми;

г) вище ізотерми.

22 Де розташовані процеси з відведенням теплоти на p - v -діаграмі?

- а) нижче адіабати;
- б) вище адіабати;
- в) нижче ізотерми;
- г) вище ізотерми.

23 Де розташовані процеси, що протікають зі збільшенням внутрішньої енергії на p - v - діаграмі?

- а) нижче адіабати;
- б) вище адіабати;
- в) нижче ізотерми;
- г) вище ізотерми.

24 Де розташовані процеси, що протікають зі зменшенням внутрішньої енергії на p - v - діаграмі?

- а) нижче адіабати;
- б) вище адіабати;
- в) нижче ізотерми;
- г) вище ізотерми.

25 Як записується рівняння I закону термодинаміки для ізохорного процесу?

- а) $dq = du$;
- б) $dq = dh$;
- в) $dq = dl$.

26 Як записується рівняння I закону термодинаміки для ізобарного процесу?

- а) $dq = du$;
- б) $dq = dh$;
- в) $dq = dl$.

27 Як записується рівняння I закону термодинаміки для ізотермічного процесу?

- а) $dq = du$;
- б) $dq = dh$;

в) $dq = dl$.

28 Як записується рівняння I закону термодинаміки для адіабатного процесу?

а) $dq = dh$;

б) $dq = du$;

в) $du = dh$;

г) $du = -dl$.

РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ

Ізохорний процес

Завдання 1. Газ при тиску $p_1 = 10$ бар і температурі $t_1 = 20$ °С нагрівається при постійному об'ємі до $t_2 = 300$ °С.

Визначити кінцевий тиск газу.

Завдання 2. У закритій ємності об'ємом $V = 0,3$ м³ міститься 2,75 кг повітря при тиску $p_1 = 8$ бар і температурі $t_1 = 25$ °С.

Визначити кінцевий об'єм і тиск після охолодження повітря до 0 °С.

Завдання 3. Закрита ємність містить газ при розрідженні $p_1 = 50$ мм рт. ст. і температурі $t_1 = 70$ °С. Показання барометра $B = 760$ мм рт. ст.

До якої температури потрібно охолоджувати газ, щоб розрідження дорівнювало $p_2 = 100$ мм рт.?

Завдання 4. У закритій ємності об'ємом $V = 0,6$ м³ міститься повітря при тиску $p_1 = 5$ бар і температурі $t_1 = 20$ °С. В результаті охолодження ємності повітря втрачає 105 кДж теплоти. Теплоємність повітря вважати постійною.

Визначити тиск і температуру повітря в ємності після охолодження.

Завдання 5. Ємність об'ємом 90 л містить повітря при тиску 8 бар і температурі 30 °С.

Визначити кількість теплоти, яку необхідно підвести до повітря, щоб підвищити його тиск при $v = \text{const}$ до 16 бар.

Залежність теплоємності від температури вважати нелінійною. Відповідь навести у кілокалоріях.

Завдання 6. До якої температури потрібно охолоджувати $0,8 \text{ м}^3$ повітря з початковим тиском 3 бар і температурою $15 \text{ }^\circ\text{C}$, щоб тиск при постійному об'ємі знизився до 1 бар? Яку кількість теплоти потрібно при цьому відвести? Теплоємність повітря вважати постійною.

Завдання 7. Ємність об'ємом 60 л заповнена киснем при тиску $p_1 = 125$ бар.

Визначити кінцевий тиск кисню і кількість теплоти процесу, якщо початкова температура кисню $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, а кінцева $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплоємність вважати постійною.

Ізобарний процес

Завдання 8. Яку кількість теплоти необхідно витратити, щоб нагріти 2 м^3 повітря при постійному надлишковому тиску $p = 2$ бар від $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$? Яку роботу при цьому виконає повітря? Атмосферний тиск дорівнює 760 мм рт. ст.

Завдання 9. Визначити кількість теплоти, необхідної для підігріву 2000 м^3 повітря при постійному тиску $p = 5$ бар від $t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Залежність температури від теплоємності прийняти нелінійною.

Завдання 10. У циліндрі знаходиться повітря при тиску $p = 5$ бар і температурі $t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Від повітря віднімається теплота при постійному тиску таким чином, що наприкінці процесу встановлюється температура $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Об'єм циліндра, у якому міститься повітря, дорівнює 400 л.

Визначити кількість теплоти процесу, кінцевий об'єм, зміну внутрішньої енергії і здійснену роботу стиснення. Залежність теплоємності від температури вважати нелінійною.

Завдання 11. 2 м^3 повітря з початковою температурою $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ розширюються при постійному тиску до 3 м^3 за рахунок підведення до газу 837 кДж тепла.

Визначити кінцеву температуру, тиск газу в процесі і роботу розширення.

Завдання 12. До газоподібних продуктів згорання, що знаходяться в циліндрі двигуна внутрішнього згорання, підводиться при постійному тиску стільки тепла, що температура суміші підвищується з 500 до 1900 °С. Склад газової суміші: $g_{H_2O} = 6\%$; $g_{N_2} = 74\%$; $g_{CO_2} = 15\%$; $g_{O_2} = 5\%$.

Визначити кількість теплоти, підведеної до 1 кг суміші, теплоємність від температури залежить нелінійно.

Ізотермічний процес

Завдання 13. 1 кг повітря при температурі $t_1 = 30$ °С і початковому тиску $p_1 = 1$ бар стискають ізотермічно до кінцевого тиску $p_2 = 10$ бар.

Визначити кінцевий об'єм, витрачену роботу і кількість теплоти процесу.

Завдання 14. Повітря в кількості 0,5 кг при $p_1 = 5$ бар і $t_1 = 30$ °С розширюється ізотермічно до п'ятикратного об'єму.

Визначити роботу газу, кінцевий тиск і кількість теплоти, що підводиться до газу в процесі.

Завдання 15. Повітря при $p_1 = 1$ бар і $t_1 = 27$ °С стискають у компресорі до $p_2 = 35$ бар.

Визначити величину роботи, що витрачається на стиснення 100 кг повітря, якщо процес здійснюється ізотермічно.

Завдання 16. Газ розширюється в циліндрі ізотермічно до об'єму в п'ять разів більше початкового.

Порівняти величини робіт: повного розширення і розширення на першій половині ходу поршня.

Адіабатний процес

Завдання 17. 1 кг повітря при початковій температурі $t_1 = 30$ °С і тиску $p_1 = 1$ бар стискають за адіабатою до кінцевого тиску $p_2 = 10$ бар.

Визначити кінцевий об'єм, кінцеву температуру і витрачену роботу.

Завдання 18. 1 кг повітря при початковій температурі $t_1 = 15^\circ\text{C}$ і тиску $p_1 = 1$ бар стискають за адіабатою до кінцевого тиску $p_2 = 8$ бар.

Визначити кінцевий об'єм, кінцеву температуру і витрачену роботу.

Завдання 19. Повітря при тиску $p_1 = 4,5$ бар розширюється за адіабатою до $p_2 = 1,2$ бар і охолоджується при цьому до $t_2 = -45^\circ\text{C}$.

Визначити кінцевий об'єм, кінцеву температуру і виконану роботу.

Завдання 20. 1 кг повітря, що займає об'єм $v_1 = 0,09$ м³/кг при $p_1 = 10$ бар, розширюється до десятикратного об'єму.

Визначити кінцевий тиск і роботу, що отримана в адіабатному та ізотермічному процесах.

Завдання 21. Повітря при температурі $t_1 = 25^\circ\text{C}$ адіабатно охолоджується до $t_2 = -55^\circ\text{C}$; тиск при цьому зменшується до 1 бар.

Визначити початковий тиск і роботу розширення 1 кг повітря.

Завдання 22. Температуру повітря під час адіабатного стиснення у двигуні підвищили таким чином, що вона зрівнялася з температурою займання нафти; об'єм при цьому зменшився в 14 разів.

Визначити кінцеву температуру і кінцевий тиск повітря, якщо $p_1 = 1$ бар і $t_1 = 100^\circ\text{C}$.

Завдання 23. З ємності з вуглекислим газом при тиску 10 бар і температурі 30°C витікає $2/3$ вмісту. Визначити кінцевий тиск і температуру, якщо в процесі не відбувається теплообміну з навколишнім середовищем.

Політропний процес

Завдання 24. 1 кг повітря при тиску $p_1 = 5$ бар і температурі $t_1 = 110^\circ\text{C}$ розширюється за політропою до тиску $p_2 = 1$ бар.

Визначити кінцевий стан повітря, зміну внутрішньої енергії, кількість підведеного тепла і отриману роботу, якщо показник політропи дорівнює 1,2.

Завдання 25. 1,5 кг повітря стискають за політропою від $p_1 = 0,9$ бар і $t_1 = 18$ °С до $p_2 = 10$ бар і $t_2 = 125$ °С.

Визначити показник політропи, кінцевий об'єм, витрачену роботу і кількість відведеної теплоти.

Завдання 26. 5 м³ повітря при тиску $p_1 = 4$ бар і температурі $t_1 = 60$ °С розширюються за політропою до трикратного об'єму і тиску $p_2 = 1$ бар.

Визначити показник політропи, роботу розширення, кількість підведеної теплоти та зміну внутрішньої енергії.

Завдання 27. 20 м³ повітря при тиску $p_1 = 1$ бар і температурі $t_1 = 18$ °С стискають за політропою до $p_2 = 8$ бар. При цьому показник політропи дорівнює 1,2.

Визначити роботу, необхідну для отримання 1 м³ стисненого повітря, і кількість відведеного тепла.

ТЕМА 6. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Другий закон термодинаміки визначає напрям, у якому протікають процеси, встановлює умови перетворення теплової енергії в механічну, а також визначає максимальну роботу, що може бути вироблена тепловим двигуном.

Другий закон термодинаміки може бути записаний таким чином:

$$ds \geq \frac{dQ}{T}. \quad (6.1)$$

У виразі (6.1) знак «більше» відповідає необоротним процесам, а знак «дорівнює» – оборотним процесам. Таким чином, аналітичний вираз другого закону термодинаміки для нескінченно малого оборотного процесу має вигляд:

$$dQ = T ds. \quad (6.2)$$

Відповідно до першого закону термодинаміки:

$$dQ = dU + pdV, \quad (6.3)$$

то рівняння (6.2) має вигляд:

$$T ds = dU + pdV. \quad (6.4)$$

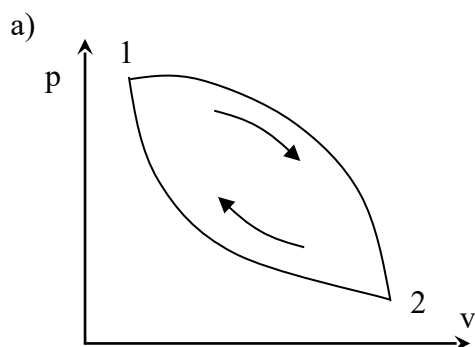
Цикл, у результаті якого отримують позитивну роботу, називають *прямим циклом* (рисунок 6.1, а), або циклом теплового двигуна (робота розширення більше роботи стиснення).

Відношення кількості теплоти, що перетворена в позитивну роботу за один цикл, до всієї теплоти, яка підведена до робочого тіла, називається *термічним коефіцієнтом корисної дії* (ККД) прямого циклу.

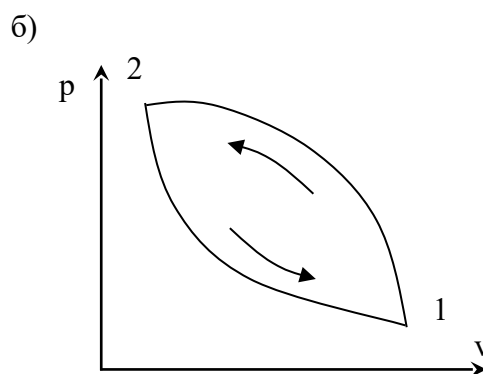
$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{l}{q_1}. \quad (6.5)$$

Величина термічного ККД циклу завжди менше одиниці.

Цикл, в результаті якого витрачається робота, називають *зворотним циклом* (рисунок 6.1, б), або циклом холодильної машини (робота розширення менше роботи стиснення).



45



- а – прямий – за годинниковою стрілкою;
- б – зворотний – проти годинникової стрілки

Рисунок 6.1 – Цикли

Ступінь довершеності зворотного циклу визначають *холодильним коефіцієнтом циклу*:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_1}. \quad (6.6)$$

Холодильний коефіцієнт, як правило, більше одиниці.

Середньоінтегральна температура для будь-якого процесу дорівнює відношенню кількості теплоти процесу до зміни ентропії робочого тіла:

$$T_{СИ} = \frac{\int_1^2 T ds}{s_2 - s_1} = \frac{q}{s_2 - s_1}. \quad (6.7)$$

Рівняння (6.7) може бути використане для визначення термічного ККД довільного циклу з адіабатним стисненням і розширенням робочого тіла (рисунок 6.2).

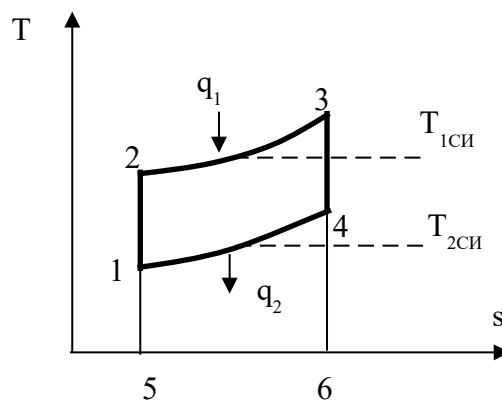


Рисунок 6.2 – Визначення середньоінтегральної температури

Кількість підведеної теплоти: $q_1 = T_{1СИ}(s_6 - s_5)$; кількість відведеної теплоти: $q_2 = T_{2СИ}(s_6 - s_5)$. Звідки термічний ККД довільного циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_{2СИ}(s_6 - s_5)}{T_{1СИ}(s_6 - s_5)}, \quad (6.8)$$

або

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{2СИ}}{T_{1СИ}}. \quad (6.9)$$

Таким чином, термічний ККД довільного циклу дорівнює термічному ККД циклу, що здійснюється між середньоінтегральними температурами процесів підведення та відведення теплоти.

Тестові завдання

1 *Укажіть рівняння другого закону термодинаміки для будь-яких процесів.*

- а) $dq = Tds$;
- б) $dq \leq Tds$;
- в) $dq \geq Tds$.

2 *Як зміниться ентропія в ізольованій системі при протіканні в ній оборотних процесів?*

- а) $dS = 0$;

- б) $dS > 0$;
- в) $dS < 0$.

3 Як зміниться ентропія в ізольованій системі при протіканні в ній необоротних процесів?

- а) $dS=0$;
- б) $dS>0$;
- в) $dS<0$.

4 Який круговий процес називається зворотним циклом?

- а) оборотний;
- б) за годинниковою стрілкою;
- в) необоротний;
- Д) проти годинникової стрілки.

5 Який круговий цикл називається прямим?

- а) оборотний;
- б) за годинниковою стрілкою;
- в) необоротний;
- Д) проти годинникової стрілки.

6 За якою формулою визначається термічний ККД циклу?

- а) $\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$;
- б) $\eta_t = \frac{q_2 - q_1}{q_1}$;
- в) $\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_2}$;
- Д) $\eta_t = \frac{q_2 - q_1}{q_2}$.

7 Що потрібно зробити для підвищення ККД будь-якого циклу?

- а) збільшити середню температуру підведення теплоти $T_{1\text{порівн}}$;
- б) зменшити середню температуру підведення теплоти $T_{1\text{порівн}}$;
- в) збільшити середню температуру відведення теплоти $T_{2\text{порівн}}$;
- г) зменшити середню температуру відведення теплоти $T_{2\text{порівн}}$.

8 За якою формулою визначається холодильний коефіцієнт?

a) $\varepsilon = \frac{q_1}{q_1 - q_2}$;

б) $\varepsilon = \frac{q_1}{q_2 - q_1}$;

в) $\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$;

д) $\varepsilon = \frac{q_2}{q_2 - q_1}$.

9 Як визначаються середньоінтегральні температури?

a) $T_{cp} = \frac{s_2 - s_1}{\int_{ABC} T ds}$;

б) $T_{cp} = \frac{\int_{ABC} T ds}{s_2 - s_1}$;

в) $T_{cp} = (s_2 - s_1) \int_{ABC} T ds$.

10 Чому дорівнює зміна ентропії в ізохорному процесі?

a) $S_2 - S_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$;

б) $S_2 - S_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$;

в) $S_2 - S_1 = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}$.

11 Чому дорівнює зміна ентропії в ізобарному процесі?

a) $S_2 - S_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$;

б) $S_2 - S_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$;

$$в) S_2 - S_1 = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

12 Чому дорівнює зміна ентропії в ізотермічному процесі?

$$а) S_2 - S_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$б) S_2 - S_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$в) S_2 - S_1 = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Розрахункові завдання

Завдання 1. У політропному процесі температура повітря зменшується зі 120 до 50 °С. Початковий тиск повітря $p_1 = 5$ бар.

Визначити зміну ентропії, якщо до повітря підводиться 60 кДж/кг теплоти. Теплоємність $c_v = 0,72$ кДж/(кг К).

Завдання 2. 1 кг кисню при температурі $t_1 = 150$ °С розширюється до п'ятикратного об'єму. При цьому його температура зменшується до $t_2 = 30$ °С.

Визначити зміну ентропії. Залежність теплоємності від температури вважати нелінійною.

Завдання 3. 1 кг повітря стискають за адіабатою таким чином, що об'єм його зменшується в 6 разів, а після цього при постійному об'ємі тиск підвищують в 1,5 рази.

Визначити сумарну зміну ентропії.

Завдання 4. У процесі політропного розширення повітря температура його зменшилася від $t_1 = 25$ °С до $t_2 = -37$ °С. Початковий тиск повітря $p_1 = 4$ бар, а кількість $M = 2$ кг. Теплоємність вважати постійною.

Визначити зміну ентропії в процесі, якщо кількість підведеної до повітря теплоти складає 89,2 кДж.

Завдання 5. Побудувати в Ts-діаграмі для 1 кг повітря в інтервалі температур від 0 до 200 °С ізохори: $v_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_3 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$. Теплоємність вважати постійною.

Завдання 6. До газу в круговому процесі підводиться 250 кДж тепла. Термічний ККД дорівнює 0,46.

Визначити роботу, отриману за такий цикл.

Завдання 7. В результаті здійснення кругового процесу отримана робота, яка дорівнює 80 кДж, при цьому віддано охолоджувачу 50 кДж тепла.

Визначити термічний к.к.д. циклу.

ТЕМА 7. ЦИКЛ КАРНО

Прямий оборотний цикл Карно складається з двох оборотних ізотермічних та двох оборотних адіабатних процесів (рис. 7.1).

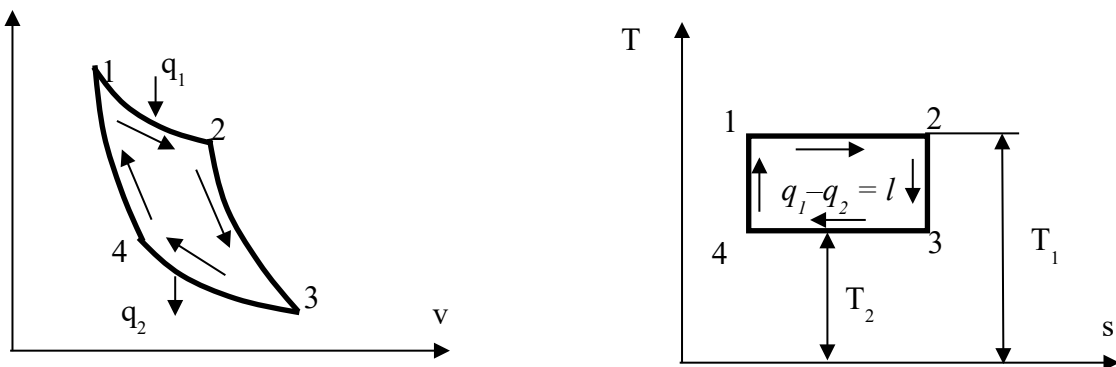


Рисунок 7.1 – Прямий оборотний цикл Карно

Термічний ККД прямого оборотного циклу Карно залежить тільки від абсолютних температур джерел теплоти і дорівнює:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (7.1)$$

Зворотний оборотний цикл Карно складається з двох оборотних ізотермічних та двох оборотних адіабатних процесів (рис. ур. 7.1).

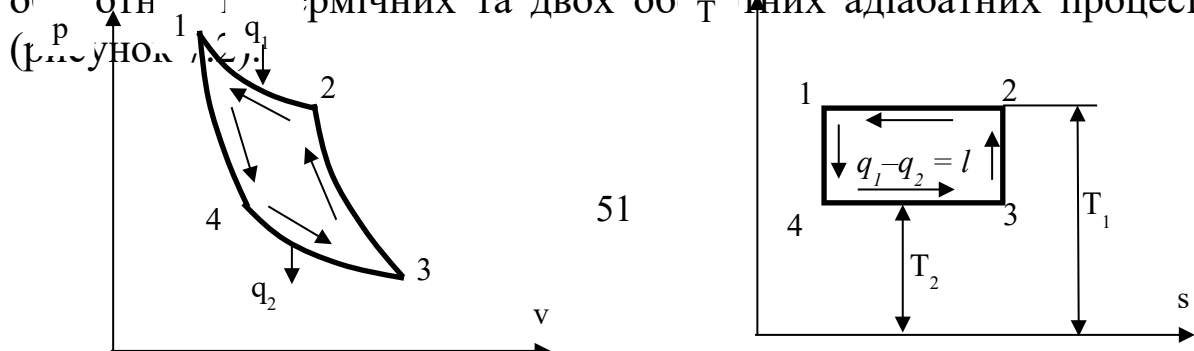


Рисунок 7.2 – Зворотний оборотний цикл Карно

Холодильний коефіцієнт зворотного оборотного циклу Карно залежить тільки від абсолютних температур джерел теплоти і дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (7.2)$$

Регенеративний цикл Карно складається з двох ізотерм та двох довільних еквідистантних кривих.

Термічний ККД регенеративного циклу дорівнює термічному ККД оборотного циклу Карно:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (7.3)$$

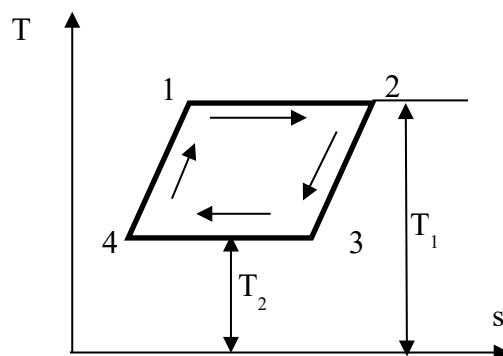


Рисунок 7.3 – Регенеративний цикл Карно

Тестові завдання

1 Які процеси утворюють цикл Карно?

- а) дві ізобари і дві ізотерми;
- б) дві ізотерми і дві адіабати;
- в) дві ізобари і дві адіабати.

2 Скільки джерел теплоти в циклі Карно?

- а) два;
- б) чотири;
- в) нескінченна множина.

3 Чому дорівнює термічний ККД циклу Карно?

- а) $\eta_t = 1$;
- б) $\eta_t > 1$;
- в) $\eta_t < 1$.

4 Від чого залежить термічний ККД циклу Карно?

- а) від фізичних властивостей робочого тіла;
- б) від температури тепловіддавача;
- в) від температури теплоприймача;
- г) від початкових параметрів.

5 Від чого залежить холодильний коефіцієнт циклу Карно?

- а) від фізичних властивостей робочого тіла;
- б) від температури тепловіддавача;
- в) від температури теплоприймача;
- г) від початкових параметрів.

6 Виберіть правильне співвідношення між η_t і ε .

- а) $\eta_t = \varepsilon$;
- б) $\eta_e > \varepsilon$;
- в) $\eta_e < \varepsilon$.

7 При яких умовах термічний ККД циклу може дорівнювати одиниці?

- а) $q_1 = 0$;
- б) $q_1 = \infty$;
- в) $q_2 = 0$;
- г) $q_2 = \infty$.

8 При яких умовах термічний ККД циклу Карно може дорівнювати одиниці?

- а) $T_1 = 0$;
- б) $T_1 = \infty$;
- в) $T_2 = 0$;
- г) $T_2 = \infty$.

9 Виберіть правильне співвідношення між термічним ККД теплового двигуна і ККД циклу Карно.

- а) $\eta_t > \eta_{t \text{ Карно}}$;
- б) $\eta_t < \eta_{t \text{ Карно}}$;
- в) $\eta_t = \eta_{t \text{ Карно}}$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. 1 кг повітря здійснює цикл Карно в межах температур $t_1 = 627^\circ\text{C}$ і $t_2 = 2^\circ\text{C}$, при цьому найбільший тиск складає 60 бар, а найменший – 1 бар.

Визначити параметри стану повітря в точках циклу, роботу, термічний ККД циклу, кількість підведеного і відведеного тепла. Побудувати цикл в pV - та Ts -діаграмах.

Завдання 2. 1 кг повітря здійснює цикл Карно в межах температур $t_1 = 32^\circ\text{C}$ і $t_2 = 2^\circ\text{C}$, при цьому найбільший тиск складає 20 бар, а найменший – 1,2 бар.

Визначити параметри стану повітря в точках циклу, роботу, термічний ККД циклу, кількість підведеного і відведеного тепла. Побудувати цикл в pV та Ts -діаграмах.

Завдання 3. 1 кг повітря здійснює цикл Карно в межах температур $t_1 = 25^\circ\text{C}$ і $t_2 = 3^\circ\text{C}$, при цьому найбільший тиск складає 10 бар, а найменший – 1,2 бар.

Визначити параметри стану повітря в точках циклу, роботу, термічний ККД циклу, кількість підведеного і відведеного тепла. Побудувати цикл в pV та Ts -діаграмах.

Завдання 4. Визначити середньоарифметичну і середньоінтегральну температури газу в політропному процесі, якщо початкова температура $T_1 = 800\text{ K}$, а кінцева $T_2 = 2000\text{ K}$.

Завдання 5. Визначити кількість теплоти, яку необхідно витратити, щоб у політропному процесі нагріти 5 кг повітря від $T_1 = 300\text{ K}$ при тиску $p_1 = 4\text{ бар}$ до температури 1000 K при тиску 10 бар. Теплоємність повітря вважати постійною.

ТЕМА 8. ЕКСЕРГІЯ РОБОЧОГО ТІЛА. УТРАТА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Усі реальні процеси є необоротними, тому ентропія ізольованої системи завжди збільшується. Зростання ентропії при необоротних процесах пов'язане із зменшенням працездатності ізольованої системи.

Розглянемо ідеальну машину, що працює за циклом Карно, у якій робочому тілу передається теплота Q_1 при температурі T_1 та відводиться теплота Q_2 у теплоприймач при температурі T_2 .

Введемо між тепловіддавачем з температурою T_1 і робочим тілом проміжне джерело теплоти з температурою $T_2 < T_1' < T_1$. Передаватимемо теплоту від тепловіддавача спочатку необоротним шляхом (при кінцевій різниці температур) проміжному джерелу, а від нього при температурі T_1' – робочому тілу, що здійснює оборотний цикл Карно. Якщо кількість теплоти Q_1 надходитиме в машину з нижчою температурою $T_1' < T_1$, то, очевидно, позитивна робота повинна зменшитися, оскільки зменшується різниця температур, між якими здійснюється оборотний цикл Карно.

Зменшення працездатності робочого тіла внаслідок уведення додаткового необоротного процесу передачі теплоти від тепловіддавача до проміжного джерела теплоти визначається з рівняння:

$$L_0 = T_2 (Q_1/T_1' - Q_1/T_1) = T_2 \Delta S_{\text{сист.}} \quad (8.1)$$

Рівняння (8.1) має назву *рівняння Гюї-Стодоли*: зменшення працездатності ізольованої системи, у якій відбуваються необоротні процеси, дорівнює добутку приросту ентропії системи і абсолютної температури теплоприймача. Ця втрата працездатності є теплотою, марно переданою навколишньому середовищу. Усі необоротні процеси в ізольованій системі супроводжуються знеціненням енергії, яка з кориснішої форми переходить в менш корисну. Відбувається розсіювання енергії і її деградація. Ентропія системи при цьому збільшується.

Максимальна корисна робота, яку одержують від робочого тіла, при зміні його стану від первинного до стану середовища виходить при здійсненні оборотних адіабатних і ізотермічних процесів:

$$L'_{\text{max}} = (I_1 - I_0) - T_0 (S_1 - S_0), \quad (8.2)$$

де I_0 і S_0 – ентальпія та ентропія робочого тіла в стані рівноваги з навколишнім середовищем.

У рівнянні (8.2) $(I_1 - I_0)$ є корисною зовнішньою роботою в оборотному адіабатному процесі робочого тіла, а $T_0 (S_1 - S_0)$ –

корисною зовнішньою роботою в оборотному ізотермічному процесі робочого тіла.

Одержану за рівнянням максимальну корисну роботу називають *працездатністю* або повною *ексергією* тіла.

Питомою ексергією e називають величину питомої працездатності теплоти, або потоку робочого тіла, в оборотному термодинамічному процесі зміни стану системи від початкових параметрів до постійних параметрів середовища. Цей оборотний перехід для потоку робочого тіла можливий двома оборотними процесами: адіабатним (із зміною температури робочого тіла від початкової T_1 до температури середовища T_0) та ізотермічним (із зміною тиску, відповідного кінцю адіабатного процесу, до тиску середовища p_0).

Ексергію потоку робочого тіла для 1 кг робочого тіла можна визначити:

$$e = (i_1 - i_0) - T_0(S_1 - S_0). \quad (8.3)$$

Якщо в будь-якому процесі зміни стану кінцеві параметри будуть відмінні від параметрів середовища, то дійсна робота, одержана в цьому процесі, виразиться як різниця ексергії початку і кінця процесу, тобто

$$e_{\text{дійств}} = e_1 - e_2. \quad (8.4)$$

Працездатність, або ексергію, теплоти визначають з тієї умови, що максимально можливу роботу можна одержати при здійсненні оборотного циклу Карно між початковою температурою і температурою навколишнього середовища:

$$dq = dq \eta_i^{\text{Карно}} = dq \left(1 - \frac{T_0}{T}\right); \quad (8.5)$$

$$e_q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dq = \left(1 - \frac{T_0}{T_{cp}}\right) q_{1-2}, \quad (8.6)$$

де e_q – ексергія (працездатність) теплоти;

T_{cp} – середня температура в процесі.

Якщо в будь-якому процесі сумарна кількість ексергії, що надходить у систему, більша, ніж та, що відводиться від неї, то різниця цих величин характеризує втрати ексергії від незворотності процесу. Отже, поняття *ексергетичного ККД* характеризує ступінь оборотності процесу:

$$\eta_e = 1 - \frac{\Delta e}{e_1}, \quad (8.7)$$

де Δe – різниця підведеної та відведеної ексергії;
 e_1 – підведена ексергія.

Тестові завдання

1 Питома ексергія – це:

А) відношення кількості теплоти, що бере участь у процесі, до зміни ентропії робочого тіла;

В) величина питомої працездатності теплоти або потоку робочого тіла в оборотному термодинамічному процесі зміни стану системи від початкових параметрів до постійних параметрів середовища;

С) функції, за допомогою яких і за допомогою їх похідних різних порядків можуть бути явно виражені всі термодинамічні властивості системи.

2 За якою формулою обчислюється фізична ексергія?

а) $e = (h_1 - h_0) - T_0 (S_1 - S_0)$;

б) $e = (h_1 - h_0) + T_0 (S_1 - S_0)$;

в) $e = (h_1 + h_0) - T_0 (S_1 + S_0)$;

г) $e = (h_1 - h_0) + T_0 (S_0 - S_1)$;

3 Як записується рівняння Гюї-Стодоли?

а) $l_{\max} - l = T_0 \Delta S_H$;

б) $l - l_{\max} = T_0 \Delta S_H$;

в) $l + l_{\max} = T_0 \Delta S_H$.

4 Як змінюється ексергія при наявності необоротних процесів у системі?

- а) зростає;
- б) зменшується;
- в) не змінюється.

5 За якою формулою обчислюється ексергія теплоти?

- а) $e_q = q_1 (1 - T_0 / T_1)$;
- б) $e_q = q_1 (1 - T_1 / T_0)$;
- в) $e_q = q_0 (1 - T_0 / T_1)$;
- г) $e_q = q_0 (1 - T_1 / T_0)$.

6 За якою формулою обчислюється ексергетичний ККД?

- а) $\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$;
- б) $\eta_t = 1 - \frac{\Delta e}{e_1}$;
- в) $\eta_t = 1 - \frac{e}{e_0}$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Визначити максимальну корисну роботу, яка може бути здійснена 1 кг кисню, якщо його початковий стан характеризується параметрами $t_1 = 400$ °С і $p_1 = 1$ бар, а стан середовища – параметрами $t_0 = 20$ °С і $p_0 = 1$ бар. Навести процес в pV - та Ts -діаграмах.

Завдання 2. В ємності об'ємом 300 л міститься повітря при тиску $p_1 = 50$ бар і температурі $t_1 = 20$ °С. Параметри середовища: $t_0 = 20$ °С і $p_0 = 1$ бар.

Визначити максимальну корисну роботу, яку може здійснити стиснене повітря, що знаходиться в ємності. Навести процес в pV - та Ts -діаграмах.

Завдання 3. Визначити максимальну корисну роботу 1 м³ повітря при тиску $p_1 = 100$ бар і температурі $T_1 = 300$ К; тиск зовнішнього середовища $p_0 = 1$ бар і температура $T_1 = 300$ К.

Завдання 4. Визначити втрату працездатності на 1 кг прохідного газу.

Повітря в протиструминному теплообміннику нагрівається від температури $t_1 = 40\text{ }^\circ\text{C}$, а газ охолоджується від температури $t_3 = 450\text{ }^\circ\text{C}$ до температури $t_4 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ при $p = \text{const}$. Теплові втрати теплообмінника складають 20 % від теплоти, що віддається газом. Газ і повітря вважати ідеальними газами з властивостями повітря. Теплоємність повітря і газів вважати постійними величинами. Температура навколишнього середовища $t_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$.

Завдання 5. Визначити втрату працездатності внаслідок теплообміну в регенеративному теплообміннику газотурбінної установки.

Повітря в теплообміннику нагрівається від температури $t_1 = 160\text{ }^\circ\text{C}$, а газ охолоджується від температури $t_3 = 400\text{ }^\circ\text{C}$ до температури $t_4 = 240\text{ }^\circ\text{C}$ при $p = \text{const}$. Теплові втрати теплообмінника складають 10 % від теплоти, що віддається газом. Газ і повітря вважати ідеальними газами з властивостями повітря. Теплоємність повітря і газів вважати постійними величинами. Температура навколишнього середовища $t_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$. Втрату працездатності розрахувати на 1 кг прохідного газу.

Завдання 6. У регенеративному теплообміннику газотурбінної установки повітря нагрівається за рахунок вихлопних газів, що виходять з турбіни. Повітря нагрівається від температури $t_1 = 140\text{ }^\circ\text{C}$ до температури $t_2 = 270\text{ }^\circ\text{C}$, а газ відповідно охолоджується від температури $t_3 = 340\text{ }^\circ\text{C}$ до температури $t_4 = 210\text{ }^\circ\text{C}$ при $p = \text{const}$.

Визначити втрату працездатності газотурбінної установки внаслідок такого теплообміну в розрахунок на 1 кг прохідного газу. Газ і повітря вважати ідеальними газами з властивостями повітря. Теплоємність повітря і газів вважати постійними величинами.

ТЕМА 9. ВОДЯНА ПАРА. АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ

Пара, що знаходиться в зіткненні з рідиною і в термічній з нею рівновазі, називається *насиченою*.

Насичена пара, в якій відсутні зважені високодисперсні частинки рідкої фази, називається *сухою насиченою парою*.

Насичена пара, в якій містяться зважені високодисперсні частинки рідкої фази, рівномірно розподілені по всій масі пари, називається *вологою насиченою парою*.

Масова частка сухої насиченої пари у вологій парі називається *ступенем сухості* x :

$$x = \frac{\text{маса сухої насиченої пари у вологій парі}}{\text{маса вологої пари}}. \quad (9.1)$$

Масова частка киплячої рідини у вологій парі дорівнює $(1 - x)$ і називається *ступенем вологості*.

Якщо сухій насиченій парі підвести деяку кількість теплоти при постійному тиску, то її температура зростатиме. Пара, яку одержують у цьому процесі, називається *перегрітою*. Перегріта пара має при даному тиску вищу температуру і питомий об'єм, ніж суха насичена пара.

Основні параметри рідини та сухої насиченої пари

Питомий об'єм води при температурі 0°C і різному тиску можна приблизно приймати рівним $v_0 \approx 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$. Питомий об'єм киплячої води v' із збільшенням тиску, а отже, і температури зростає і при високому тиску значно відрізняється від об'єму при температурі 0°C .

Кількість теплоти, що витрачається на нагрівання води від температури 0°C до температури кипіння при відповідному тиску, визначається за рівнянням:

$$q = h' - h'_0, \quad (9.2)$$

де h' – ентальпія киплячої рідини;
 h'_0 – ентальпія води при 0°C .

Внутрішня енергія води в потрібній точці – величина дуже невелика, тому можна вважати, що внутрішня енергія рідини при 0°C $u'_{\sigma} \approx 0$.

Ентальпія киплячої рідини визначається за тиском або температурою і береться з таблиць насиченої водяної пари.

Внутрішня енергія киплячої рідини u' визначається із загальної формули для ентальпії:

$$u' = h' - pv' . \quad (9.3)$$

Кількість теплоти, витрачена на паротворення 1 кг води при температурі кипіння до сухої насиченої пари, називається *теплотою паротворення* і позначається буквою r . Теплота паротворення r цілком визначається тиском або температурою. Із зростанням останніх r зменшується і в критичній точці дорівнює нулю.

Теплота паротворення r витрачається на зміну внутрішньої потенційної енергії або на роботу дисгрегації (роз'єднання) ρ та на зовнішню роботу розширення $\psi = p (v'' - v')$.

Теплота паротворення:

$$r = \rho + p (v'' - v') = \rho + \psi. \quad (9.4)$$

Ентальпія сухої насиченої пари i'' визначається за формулою

$$i'' = i' + r. \quad (9.5)$$

Внутрішня енергія u'' сухої насиченої пари визначається за формулою

$$u'' = i'' - pv''. \quad (9.6)$$

Суха насичена пара визначається одним параметром: тиском або температурою.

Основні параметри вологої насиченої водяної пари

Волога пара визначається тиском p або температурою t_H і ступенем сухості x .

Температура вологої пари рівна температурі кипіння рідини при даному тиску. *Питомий об'єм вологої пари* v_x визначається як об'єм суміші, що складається із сухої пари і води:

$$v_x = v''x + (1 - x) v' \quad (9.7)$$

Ентальпія вологої пари i_x визначається за формулою

$$i_x = i' + rx, \quad (9.8)$$

де i' – ентальпія рідини;

rx – кількість теплоти, що витрачена на випарювання x частки води.

Внутрішня енергія вологої пари u_x визначається за формулою

$$u_x = i_x - pv_x \quad (9.9)$$

Основні параметри перегрітої пари

Теплотою перегріву прийнято називати таку кількість теплоти, яку необхідно витратити на перегрів 1 кг сухої пари до необхідної температури при постійному тиску.

Кількість теплоти, що підводиться в процесі перегріву пари, може бути визначена за рівнянням:

$$q_{II} = \int_{t_H}^t C_p dt; \quad (9.10)$$

$$q_{II} = C_{pm} \Big|_{t_H}^t (t - t_H), \quad (9.11)$$

де C_p – дійсна теплоємність перегрітої пари при постійному тиску;

C_{pm} – середня теплоємність перегрітої пари в інтервалі температур від t_H до t .

Оскільки теплота перегріву $q_{п}$, що підводиться до пари при постійному тиску, витрачається тільки на зміну її ентальпії, то *ентальпія перегрітої пари* визначається за загальним рівнянням

$$h = h' + r + C_p \int_{t_H}^t dt. \quad (9.12)$$

Внутрішня енергія *перегрітої пари* u дорівнює

$$u = i - pv, \quad (9.13)$$

де v – питомий об'єм перегрітої пари.

Ентропія води і водяної пари

Після підігріву води до температури кипіння починається процес паротворення при постійному тиску і незмінній температурі T_H .

Ентропія сухої пари s'' визначається за формулою

$$s'' = s' + r/T_H. \quad (9.14)$$

Ентропія вологої пари s_x визначається за формулою

$$s_x = s' + rx/T_H. \quad (9.15)$$

Зміну ентропії в процесі перегріву пари від T_H до T одержують з рівняння

$$\int_{T_H}^T \frac{dq}{T} = \int_{T_H}^T \frac{dh}{T} \quad (9.16)$$

де s – ентропія перегрітої пари;

T – температура перегрітої пари;

dq – теплота перегріву;

dh – елементарна зміна ентальпії в процесі перегріву.

Тестові завдання

1 Що являє собою «волога пара»?

- б) суміш пари і крапель рідини;
- в) суміш пари і повітря з краплями рідини;
- г) пара на лінії насичення.

2 Які межі зміни ступеня сухості пари?

- а) $-\infty \leq x \leq +\infty$;
- б) $0 \leq x \leq 100\%$;
- в) $0 \leq x \leq 1$;
- г) $-1 \leq x \leq 1$.

3 Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії водяної пари в ізотермічному процесі?

- а) $\Delta u = 0$;
- б) $\Delta u = q - l$;
- в) $\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$.

4 Як можна обчислити кількість підведеної теплоти в ізотермічному процесі водяної пари?

- а) $q = h_2 - h_1$;
- б) $q = T(s_2 - s_1)$;
- в) $q = \Delta u$.

5 Як можна обчислити кількість підведеної теплоти в ізобарному процесі водяної пари?

- а) $q = h_2 - h_1$;
- б) $q = T(s_2 - s_1)$;
- в) $q = \Delta u$.

6 Як можна обчислити кількість підведеної теплоти в ізохорному процесі водяної пари?

а) $q = h_2 - h_1$;

б) $q = T \cdot (s_2 - s_1)$;

в) $q = \Delta u$.

7 Чому дорівнює робота водяної пари в адіабатному процесі?

а) $l = -\Delta u$;

б) $l = 0$;

в) $l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$.

8 Як визначається теплота перегріву водяної пари?

а) $q = T(s_2 - s_1)$;

б) $q = C_{pm}|_{t_u}^t (t - t_u)$;

в) $q = h_2 - h_1$.

9 Як визначається зміна внутрішньої енергії водяної пари в ізобарному процесі?

а) $\Delta u = 0$;

б) $\Delta u = q - l$;

в) $\Delta u = h_2 - h_1 - p (v_2 - v_1)$.

10 Як визначається зміна внутрішньої енергії водяної пари в ізохорному процесі?

а) $\Delta u = 0$;

б) $\Delta u = q - l$;

с) $\Delta u = h_2 - h_1 - v (p_2 - p_1)$.

11 Як визначається зміна внутрішньої енергії водяної пари в адіабатному процесі?

а) $\Delta u = 0$;

б) $\Delta u = -l$;

в) $\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$.

12 Чому дорівнює робота водяної пари в ізохорному процесі?

а) $l = q - \Delta u$;

б) $l = 0$;

в) $l = p_1 v_1 \cdot \ln v_2/v_1$.

13 Чому дорівнює робота водяної пари в ізобарному процесі?

а) $l = q - \Delta u$;

б) $l = p (v_2 - v_1)$;

в) $l = p_1 v_1 \cdot \ln p_1/p_2$.

14 Чому дорівнює робота водяної пари в ізотермічному процесі?

а) $l = q - \Delta u$;

б) $l = p (v_2 - v_1)$;

в) $l = RT_1 \cdot \ln v_2/v_1$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Визначити температуру, питомий об'єм, густину, ентальпію та ентропію сухої насиченої пари при тиску $p = 10$ бар.

Завдання 2. Суха насичена пара має тиск $p = 14$ бар. Визначити всі параметри пари.

Завдання 3. Визначити тиск, питомий об'єм і густину води, якщо вона знаходиться в стані кипіння і температура її дорівнює 250 °С.

Завдання 4. Манометр парового котла показує тиск 2 бар. Показання барометра – 776 мм рт. ст. Враховуючи, що пара є сухою насиченою, визначити її температуру, питомий об'єм та ентальпію.

Завдання 5. Визначити стан водяної пари, якщо її тиск $p = 5$ бар, а температура $t = 172$ °С.

Завдання 6. Водяна пара має параметри: $p = 30$ бар, $t = 400$ °С. Визначити всі інші параметри.

Завдання 7. Визначити кількість теплоти для перегріву 1 кг сухої насиченої пари при тиску $p = 100$ до температури $t = 500$ °С.

Завдання 8. У паровому котлі об'ємом $V = 12 \text{ м}^3$ знаходиться 1800 кг води і пари при тиску 110 бар і температурі насичення.

Визначити маси води і сухої насиченої пари, що знаходяться в котлі.

ТЕМА 10. ВОДЯНА ПАРА. ГРАФІЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ

Речовина може знаходитися у твердому, рідкому і газоподібному станах і залежно від тиску й температури одночасно бути у двох або трьох станах. Перехід речовини з твердого стану в рідкий називають *плавленням*, з твердого в газоподібне – *сублімацією*, з рідкого в газоподібне – *паротворенням*. Зворотні процеси називають *твердінням*, або *кристалізацією*, *десублімацією* і *конденсацією*.

Перехід з однієї фази в іншу називають *фазовим переходом*, або *перетворенням*. Перехід речовини із заданим тиском з однієї фази в іншу відбувається при певній температурі. Рівноважний стан фаз речовини, здатних перетворюватися одна на іншу, називають *фазовою рівновагою*.

Мольє у 1904 р. вперше була запропонована *hs-діаграма* для *водяної пари*, ім'ям якого вона звичайно і називається.

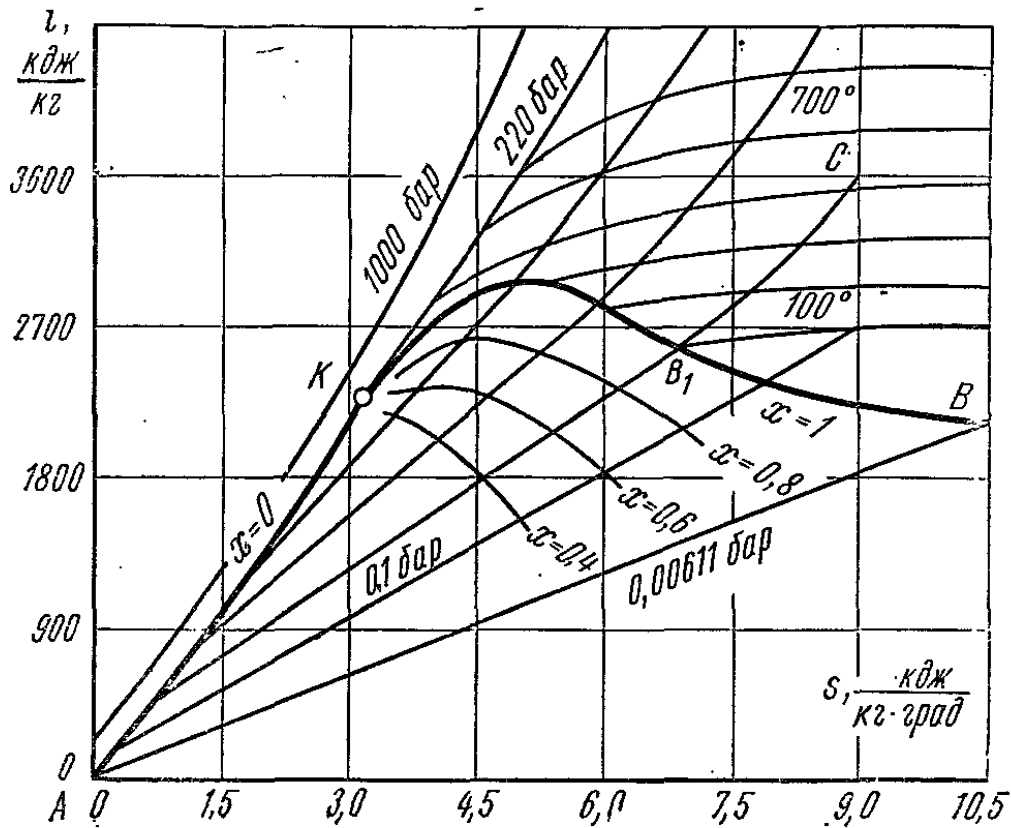


Рисунок 10.1 – hs -діаграма для водяної пари

При побудові hs -діаграми по осі ординат відкладається *ентальпія пари*, а по осі абсцис – *ентронія*. Користуючись даними таблиць водяної пари, на діаграму перш за все наносять *прикордонні криві рідини і пари*, що сходяться в критичній точці K .

Стан води зображається точками на відповідних ізобарах, які практично зливаються з прикордонною кривою рідини.

Лінії ізобар в області вологої пари є прямими лініями, що розходяться в'ялом від прикордонної кривої рідини. У області перегрітої пари ізобари мають кривизну з опуклістю, оберненою вниз.

В області вологої пари наноситься *сітка ліній постійної сухості пари* ($x=const$), які сходяться в критичній точці K .

Ізотерми в області вологої пари збігаються з ізобарами. В області перегрітої пари вони розходяться: ізобари піднімаються вгору, а ізотерми є кривими лініями, оберненими опуклістю вгору.

На діаграму наноситься *сітка ізохор*, які мають вид кривих, що піднімаються крутіше вгору в порівнянні з ізобарами.

Тестові завдання

1 Яка діаграма використовується при виконанні розрахунків з водяною парою?

- а) $T - s$;
- б) $h - d$;
- в) $h - s$;
- Д) $p - v$.

2 Які фазові області розділяє нижня прикордонна крива?

- а) рідина – (рідина + пара);
- б) (рідина + пара) – пара;
- в) рідина – газ.

3 Які фазові області розділяє верхня прикордонна крива?

- а) рідина – (рідина + пара);
- б) (рідина + пара) – пара;
- в) рідина – газ.

4 На межі яких фазових областей знаходиться критична точка?

- а) рідина – (рідина + пара);
- б) (рідина + пара) – пара;
- в) рідина – газ.

5. Який фазовий перехід називається сублімацією?

- а) твердий \rightarrow газ;
- б) твердий \rightarrow рідина;
- в) рідина \rightarrow газ;
- г) газ \rightarrow рідина.

6 Який фазовий перехід називається плавленням?

- а) твердий \rightarrow газ;
- б) твердий \rightarrow рідина;

- в) рідина → газ;
- г) газ → рідина.

7 Який фазовий перехід називається кипінням?

- а) твердий → газ;
- б) твердий → рідина;
- в) рідина → газ;
- г) газ → рідина.

8 Який фазовий перехід називається конденсацією?

- а) твердий → газ;
- б) твердий → рідина;
- в) рідина → газ;
- г) газ → рідина.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Заданий стан пари: $p = 16$ бар; $x = 0,96$.
Визначити інші параметри за допомогою $h-S$ – діаграми.

Завдання 2. За допомогою $h-S$ – діаграми визначити ентальпію: 1) сухої насиченої пари при $p = 10$ бар; 2) вологої насиченої пари при $p = 10$ бар і $x = 0,95$; 3) перегрітої пари при $p = 10$ бар і температурі $t = 300$ °С.

Завдання 3. Заданий стан пари: $p = 8$ бар; $x = 0,96$.
Визначити інші параметри за допомогою $h-S$ – діаграми.

Завдання 4. 1 кг пари при $p_1 = 18$ бар і $x_1 = 0,7$ ізотермічно розширюється до $p_2 = 8$ бар. Визначити початкові та кінцеві параметри.

Завдання 5. Суха насичена пара розширюється за адіабатою від $p_1 = 10$ бар до $p_2 = 0,5$ бар. Визначити початкові та кінцеві параметри.

Завдання 6. За допомогою $h-S$ – діаграми визначити адіабатний перепад тепла і кінцевий стан пари при розширенні від $p_1 = 14$ бар і $t_1 = 300$ °С до $p_2 = 0,06$ бар.

Завдання 7. 1 кг водяної пари при $p_1 = 4$ бар і $x_1 = 0,8$ нагрівають при постійному тиску до 160 °С. Визначити за

допомогою h - S – діаграми теплоту процесу, роботу розширення та зміну внутрішньої енергії пари.

Завдання 8. Перегріта пара при $p_1 = 80$ бар і температурі $t = 500$ °С розширюється за адіабатою до $p_2 = 0,1$ бар. Визначити за h - S – діаграмою кінцевий стан пари, зміну внутрішньої енергії та зовнішню роботу.

Завдання 9. Визначити кількість теплоти, що підводиться до пари, зміну внутрішньої енергії і роботу розширення, якщо пара з температурою $t = 400$ °С розширюється за ізотермою від $p_1 = 29$ бар до $p_2 = 20$ бар.

Завдання 10. 1 м^3 пари при тиску $p = 0,981$ МПа і температурі $t = 300$ °С охолоджується при постійному об'ємі до 180 °С. Визначити кількість теплоти, яка втрачена парою.

Завдання 11. Визначити кількість теплоти, що підводиться до пари, зміну внутрішньої енергії і роботу розширення, якщо пара з температурою $t = 300$ °С розширюється за ізотермою від тиску $p_1 = 10$ бар до $p_2 = 1$ бар.

Завдання 12. Перегріта пара при тиску $p_1 = 80$ бар і температурі $t_1 = 500$ °С розширюється за адіабатою до $p_2 = 0,1$ бар. Визначити за допомогою h - s – діаграми кінцевий стан пари, зміну внутрішньої енергії та зовнішню роботу.

Завдання 13. 1 кг водяної пари при тиску $P_1 = 20$ бар і ступені сухості $x_1 = 0,85$ нагрівається при постійному тиску до 300 °С. Визначити за допомогою h - s – діаграми теплоту в процесі, роботу розширення і зміну внутрішньої енергії пари.

ТЕМА 11. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ

Суміш сухого повітря (що не містить молекул води) з водяною парою називається *вологим повітрям*. Суміш сухого повітря і насиченої водяної пари називають *насиченим вологим*

повітрям. Суміш сухого повітря і перегрітої водяної пари називають *ненасиченим вологим повітрям*.

Абсолютною вологістю повітря називають масу водяної пари M_{Π} , кг, що міститься в 1 м^3 вологого повітря. Оскільки вологе повітря є газовою сумішшю, то об'єм пари у суміші дорівнює об'єму всієї суміші V_{CM} , отже, абсолютна вологість може бути виражена у вигляді густини пари ρ_{Π} в суміші при своєму парціальному тиску p_{Π} і температурі суміші:

$$\rho_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{V_{\Pi}} = \frac{M_{\Pi}}{V_{CM}}. \quad (11.1)$$

Відносною вологістю повітря $\varphi_{\text{в}}$ називають відношення абсолютної вологості ρ_{Π} до максимально можливої $\rho_{\text{н}}$, коли при даному тиску і температурі повітря насичене водяною парою ($\rho_{\text{max}} = \rho_{\text{н}}$):

$$\varphi = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{\text{max}}}. \quad (11.2)$$

Для ідеальних газів відношення щільності компонентів суміші можна замінити відношенням парціального тиску, тому:

$$\varphi = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{\text{max}}} = \frac{p_{\Pi}}{p_{\text{н}}}, \quad (11.3)$$

де p_{Π} – парціальний тиск водяної пари у вологому повітрі;
 $p_{\text{н}}$ – тиск насиченої водяної пари ($p_{\text{max}} = p_{\text{н}}$).

Вологовміст d вологого повітря – відношення маси M_{Π} водяної пари, що міститься у вологому повітрі, до маси $M_{\text{в}}$ сухого повітря:

$$d = M_{\Pi} / M_{\text{в}} = \rho_{\Pi} / \rho_{\text{в}}. \quad (11.4)$$

Парціальний тиск пари:

$$p_{\Pi} = p \frac{d}{0,622 + d}. \quad (11.5)$$

Парціальний тиск сухого повітря:

$$p_B = \frac{0,622p}{0,622 + d}. \quad (11.6)$$

Температура, при якій повітря стає насиченим (при $\varphi = 1$), називають *температурою точки роси* t_p .

Густина ρ вологого повітря дорівнює сумі густини сухого повітря ρ_B і водяної пари $\rho_{п}$:

$$\rho = \rho_B + \rho_{п}. \quad (11.7)$$

Питому теплоємність вологого повітря c_p зазвичай відносять до $(1 + d)$ кг вологого повітря, тобто вона дорівнює сумі теплоємностей 1 кг сухого повітря c_{pB} і d кг пари $c_{pп}$:

$$c_p = c_{pB} + dc_{pп}. \quad (11.8)$$

Ентальпія вологого повітря визначається як сума ентальпій сухого повітря і водяної пари.

Ентальпія 1 кг сухого повітря, кДж/кг чисельно рівна його температурі $t^\circ \text{C}$, оскільки теплоємність сухого повітря при постійному тиску дорівнює приблизно $1 \text{ кДж}/(\text{кг град})$.

Ентальпія 1 кг сухої насиченої пари при малому тиску може бути визначена за емпіричною формулою

$$h_{п} = 2490 + 1,97t_{п}. \quad (11.9)$$

Ентальпія вологого повітря:

$$h = t + (2490 + 1,97t_{п})d. \quad (11.10)$$

Параметри вологого повітря звичайно визначають графічним шляхом, за допомогою *hd-діаграми*, запропонованої, проф. Л.К. Рамзіним у 1918 р. (додаток Б).

На цій діаграмі по осі ординат відкладаються величини ентальпій h , кДж/кг, а по осі абсцис – вологовмісту d , г/кг сухого повітря. Для зручнішого розташування різних ліній на діаграмі

координатні осі проходять під кутом 135° , при цьому вісь ординат проводиться вертикально.

Таким чином, лінії вологовмісту d будуть вертикальними, а лінії ентальпії h – похилими прямими. На діаграмі нанесені такі лінії: лінії постійних ентальпій (прямі похилі до осі ординат під кутом 45°); лінії постійного вологовмісту (прямі паралельні осі ординат); лінії постійних температур вологого повітря; лінії відносної вологості повітря.

Процес нагрівання вологого повітря здійснюється при незмінному вологовмісті, тобто при $d = \text{const}$.

Процес охолодження вологого повітря також відбувається при $d = \text{const}$. Такий процес є дійсним тільки до стану повного насичення повітря, тобто до $\varphi = 100\%$.

Процес конденсації можна умовно вважати таким, що проходить по лінії $\varphi = 100\%$.

Тестові завдання

1 Чим відрізняється вологе повітря від звичайної газової суміші?

- а) можливістю протікання хімічних реакцій;
- б) можливістю фазових перетворень;
- в) нічим не відрізняється.

2 Що таке насичене вологе повітря?

- а) суміш сухого повітря й перегрітої водяної пари;
- б) суміш сухого повітря й сухої насиченої водяної пари;

в) суміш сухого повітря й вологої насиченої водяної пари.

3 Що таке ненасичене вологе повітря?

- а) суміш сухого повітря й перегрітої водяної пари;
- б) суміш сухого повітря й сухої насиченої водяної пари;
- в) суміш сухого повітря й вологої насиченої водяної пари.

4 Яка діаграма використовується для визначення параметрів вологого повітря?

- а) $p - v$;
- б) $T - S$;
- в) $h - S$;
- г) $h - d$.

5 Як визначити температуру точки роси?

- а) $h = \text{const}$; $\varphi = 100\%$;
- б) $t = \text{const}$; $\varphi = 100\%$;
- в) $d = \text{const}$; $\varphi = 100\%$;
- г) $p_n = \text{const}$; $\varphi = \text{const}$.

6 Як визначити температуру мокрого термометра?

- а) $h = \text{const}$; $\varphi = 100\%$;
- б) $t = \text{const}$; $\varphi = 100\%$;
- в) $d = \text{const}$; $\varphi = 100\%$;
- г) $p_n = \text{const}$; $\varphi = \text{const}$.

7 У яких межах змінюється відносна вологість повітря?

- а) $0 \leq \varphi \leq 1$;
- б) $0 \leq \varphi \leq 100\%$;
- в) $0 \leq \varphi \leq \infty$;
- г) $-\infty \leq \varphi \leq +\infty$.

8 Як визначається відносна вологість повітря?

- а) $\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}$;
- б) $\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}$;

$$\text{в) } \varphi = \frac{P_n}{P_n};$$

$$\text{г) } \varphi = \frac{P_n}{P_n}.$$

9 Що таке абсолютна вологість повітря?

- а) ρ_n – щільність водяної пари;
- б) p_n – парціальний тиск водяної пари;
- в) d - вологовміст.

10 Де знаходиться область ненасиченого вологого повітря на h - d діаграмі?

- а) нижче лінії $\varphi = 100\%$;
- б) вище лінії $\varphi = 100\%$;
- в) на лінії $\varphi = 100\%$.

11 Як зображується процес охолодження вологого повітря?

- а) $d = \text{const}$;
- б) $h = \text{const}$;
- в) $\varphi = \text{const}$.

12 Як зображується процес випадання роси на hd -діаграмі?

- а) $d = \text{const}$;
- б) $t = \text{const}$;
- в) $h = \text{const}$;
- г) $\varphi = \text{const}$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Для сушіння використовують повітря при температурі $t_1 = 25^\circ\text{C}$ і відносній вологості $\varphi = 50\%$. У повітряному підігрівачі повітря нагрівають до температури $t_2 = 90^\circ\text{C}$ і спрямовують до сушарки, звідки воно виходить при температурі $t_3 = 35^\circ\text{C}$.

Визначити кінцевий вологовміст повітря, витрату теплоти і повітря на 1 кг випареної вологи. Побудувати процеси в hd -діаграмі.

Завдання 2. Для сушки використовують повітря при температурі $t_1 = 20^\circ\text{C}$ і відносній вологості $\varphi_1 = 60\%$. В калорифері його підігрівають до температури $t_2 = 95^\circ\text{C}$ і спрямовують до сушарки, звідки воно виходить при температурі $t_3 = 35^\circ\text{C}$.

Визначити кінцевий вологовміст повітря, витрату теплоти і повітря на 1 кг випареної води. Побудувати процеси в h_d -діаграмі.

Завдання 3. До вологого повітря з параметрами $t_c = 75^\circ\text{C}$ і $\varphi = 10\%$ випаровується вода при адіабатних умовах. Температура повітря при цьому зменшується до 45°C .

Визначити відносну вологість і вологовміст повітря в кінцевому стані. Побудувати процеси в h_d -діаграмі.

Завдання 4. Стан вологого повітря характеризується параметрами: $t_c = 60^\circ\text{C}$ і $\varphi = 10\%$.

Визначити дійсну температуру мокрого термометра і температуру точки роси. Побудувати процеси в h_d -діаграмі.

ТЕМА 12. ВИТІКАННЯ ГАЗІВ І ПАРИ

Рівняння першого закону термодинаміки для 1 кг потоку газу в диференціальній формі має такий вигляд:

$$dq = du + dl' + dW^2 / 2, \quad (12.1)$$

де dq – підведена теплота від зовнішніх джерел;
 du – зміна внутрішньої енергії газу;

dl' – робота проти зовнішніх сил, що називається *роботою проитовхування* (вона не рівна роботі розширення газу dl);
 $dW^2/2$ – зміна зовнішньої кінетичної енергії робочого тіла (*наявна робота*).

Умова *нерозривності потоку* свідчить, що крізь будь-який поперечний переріз каналу в одиницю часу протікає однакова маса робочого тіла:

$$m = \frac{f_1 w_1}{v_1} = \frac{f_2 w_2}{v_2} = \frac{f w}{v} = \text{const}, \quad (12.2)$$

де f_1, f_2, \dots, f – площі поперечного перерізу каналу;
 w_1, w_2, \dots, w – швидкості робочого тіла;
 v_1, v_2, \dots, v – питомі об'єми.

При розв'язанні задач, пов'язаних з витіканням газів через сопла, необхідно перш за все визначити швидкість витікання. Для цього розраховують відношення $\beta_k = p_k/p_1$, де p_k – тиск середовища на виході із сопла (кінцевий тиск), а p_1 – тиск середовища на вході в сопло.

$$\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (12.3)$$

Величина β_k залежить тільки від показника адиабати k , тобто залежить від природи робочого тіла:

- для одноатомного газу $k = 1,67$ і $\beta_k = 0,49$;
- для двохатомного газу $k = 1,4$ і $\beta_k = 0,528$;
- для трьохатомного газу $k = 1,3$ і $\beta_k = 0,546$.

Тиск у вихідному перерізі сопла при досягненні максимальної витрати, або так званий *критичний тиск*:

$$p_k = \beta_k p_1. \quad (12.4)$$

Якщо β_k , розраховане для потоку при адіабатному витіканні, більше β_k критичного, то теоретична швидкість газу:

$$w = \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}; \quad (12.5)$$

$$w = 44,72 \sqrt{h_1 - h_2}. \quad (12.6)$$

Максимальна секундна витрата газу визначається за рівнянням:

$$m = f \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (12.7)$$

Якщо β_k , розраховане для потоку при адіабатному витіканні, менше або дорівнює β_k критичному, то теоретична швидкість газу дорівнюватиме критичній швидкості витікання:

$$w_K = 44,72 \sqrt{h_1 - h_k}; \quad (12.8)$$

$$w_K = \sqrt{2 \left(\frac{k}{k+1} \right) p_1 v_1}. \quad (12.9)$$

Максимальна секундна витрата в такому випадку газу визначається за рівнянням:

$$m_{\max} = f_{\min} \sqrt{2 \left[\frac{k}{k+1} \right] \left(\frac{p_1}{v_1} \right) \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (12.10)$$

Комбіноване сопло Лаваля призначене для використання великих перепадів тиску і для отримання швидкостей витікання, що перевищують критичну швидкість або швидкість звуку.

Сопло Лаваля складається з короткої ділянки, що звужується, і конічної насадки, що розширюється.

Швидкість закінчення і секундна витрата ідеального газу (при заданому f) визначаються за формулами:

$$w = \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}; \quad (12.11)$$

$$m = f \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] \left(\frac{p_1}{v_1} \right) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (12.12)$$

При заданій витраті площу мінімального перерізу сопла f_{\min} можна обчислити з формули

$$m_{\max} = f_{\min} \sqrt{2 \left[\frac{k}{k+1} \right] \left(\frac{p_1}{v_1} \right) \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (12.13)$$

Для двохатомних газів:

$$f_{\min} = \frac{m_{\max}}{0,686 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}. \quad (12.14)$$

Для трьохатомних газів:

$$f_{\min} = \frac{m_{\max}}{0,667 \sqrt{\frac{p_1}{v_1}}}. \quad (12.15)$$

Довжина частини, що звужується, звичайно береться рівною діаметру вихідного перерізу сопла. Довжину насадки l , що розширюється, можна визначити за рівнянням

$$l = (D - d) / 2 \operatorname{tg} \Omega / 2, \quad (12.16)$$

де Ω – кут конусності сопла;

D – діаметр вихідного отвору;

d – діаметр сопла в мінімальному перерізі.

При розрахунку процесів витікання водяної пари для випадку, коли швидкість витікання менше критичної, розрахунок швидкості витікання ведеться за формулою

$$w = 44,72\sqrt{h_1 - h_2}, \quad (12.17)$$

де h_1 і h_2 визначають за таблицями або за допомогою hs -діаграми за початковими параметрами, кінцевим тиском та виходячи з умови адіабатного процесу, при якому $s_1 = s_2$.

При критичному режимі витікання швидкість витікання водяної пари визначають з формули

$$w_K = 44,72\sqrt{h_1 - h_K}, \quad (12.18)$$

при цьому h_1 , кДж/кг, визначають за таблицями або за допомогою hs -діаграми за початковими параметрами.

Значення ентальпії h_K безпосередньо визначено бути не може, оскільки звичайно невідома величина критичного тиску. Тому рекомендується параметри пари в критичному перерізі визначати з деякою похибкою, використовуючи залежності, справедливі для ідеального газу, та метод послідовного наближення.

Швидкість витікання водяної пари з комбінованого сопла обчислюється за формулою

$$w = 44,72\sqrt{h_1 - h_2}, \quad (12.19)$$

де h_1 – ентальпія водяної пари при вході в сопло, кДж/кг;

h_2 – ентальпія пари при параметрах середовища, куди відбувається витікання, кДж/кг.

Масова секундна витрата визначається з рівняння нерозривності:

$$m = \frac{f w}{v_2}. \quad (12.20)$$

Для критичного режиму витікання масова секундна витрата:

$$m_{\max} = \frac{f_{\min} w_k}{v_k}. \quad (12.21)$$

При поворотному процесі витікання

$$w_D = 44,72 \sqrt{h_1 - h_{2D}}. \quad (12.22)$$

де w_D – дійсна швидкість витікання, м/с;
 h_{2D} – дійсне значення ентальпії в кінці процесу витікання.

Тестові завдання

1 Як формулюється закон нерозривності?

- а) $\dot{m}v = f\omega = \text{const}$;
- б) $\dot{m}\omega = fv = \text{const}$
- в) $\dot{m}\rho = fv = \text{const}$.

2 Соплами називаються канали, у яких:

- а) $dw > 0$; $dp < 0$;
- б) $dw < 0$; $dp < 0$;
- в) $dw > 0$; $dp > 0$;
- г) $dw < 0$; $dp > 0$.

3 Дифузорами називаються канали, у яких:

- а) $dw > 0$; $dp < 0$;
- б) $dw < 0$; $dp < 0$;
- в) $dw > 0$; $dp > 0$;
- г) $dw < 0$; $dp > 0$.

4 За якою формулою можна обчислити швидкість витікання ідеального газу через сопло?

а) $w = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$;

б) $w = \sqrt{2(h_1 + h_2)}$;

в) $w = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$;

г) $w = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$.

5 Чому дорівнює критична швидкість витікання?

а) $w_{\kappa.} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1}$;

б) $w_{\kappa.} = \sqrt{kp v}$;

в) $w_{\kappa.} = \sqrt{\frac{kp}{v}}$.

6 Виберіть вираз для розрахунку критичного перепаду тисків при витіканні ідеального газу.

а) $\beta_{\kappa.} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$;

б) $\beta_{\kappa.} = \left(\frac{2}{k-1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$;

в) $\beta_{\kappa.} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$;

г) $\beta_{\kappa.} = \left(\frac{2}{k-1} \right)^{\frac{k+1}{k}}$.

7 Як визначається швидкість звуку?

а) $a = \sqrt{\frac{k}{\rho_{\kappa} \nu_{\kappa}}}$;

б) $a = \sqrt{\kappa p_{\kappa} \nu_{\kappa}}$;

в) $a = k p_{\kappa} \nu_{\kappa}$.

8 Який зв'язок між швидкістю звуку й критичною швидкістю витікання?

а) $\alpha < w_{\kappa}$;

б) $\alpha > w_{\kappa}$;

в) $\alpha = w_{\kappa}$.

9 Як визначається довжина частини сопла Лаваля, що розширюється, ?

а) $l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\Omega}{2}}$;

б) $l = \frac{d + d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\Omega}{2}}$;

в) $l = \frac{d - d_{\min}}{\operatorname{tg} \Omega}$.

10 Чим характеризується реальний процес витікання?

а) зменшенням ентропії $S_{2д} < S$;

б) збільшенням ентропії $S_{2д} > S$;

в) сталістю ентропії $S_{2д} = S$.

11 Як співвідносяться між собою ентальпії наприкінці ідеального й реального процесів витікання?

а) $h_2 > h_{2д}$;

б) $h_2 < h_{2д}$;

в) $h_2 = h_{2д}$.

12 Виберіть правильне співвідношення між швидкостями витікання реальних та ідеальних газів?

а) $w_{д} > w$;

б) $w_d = w$;

в) $w_d < w$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Повітря з резервуара з постійним тиском $p_1 = 100$ бар і температурою $t_1 = 15^\circ\text{C}$ витікає в атмосферу крізь трубку діаметром $d = 10$ мм.

Визначити швидкість витікання повітря, його секундну витрату. Навколишній тиск дорівнює 1 бар. Процес розширення – адіабатний.

Завдання 2. У резервуарі з киснем підтримується тиск $p_1 = 50$ бар. Газ витікає через сопло, що звужується, до середовища з тиском 40 бар. Початкова температура кисню $t_1 = 100^\circ\text{C}$.

Визначити теоретичну швидкість витікання і витрату, якщо площа вихідного перерізу сопла $f = 20$ мм².

Знайти також теоретичну швидкість витікання кисню та його витрату. Якщо витікання відбуватиметься в атмосферу при барометричному тиску $B = 1$ бар.

Завдання 3. Визначити теоретичну швидкість витікання пари з котла в атмосферу.

Тиск пари в котлі $p_1 = 12$ бар, температура $t_1 = 300^\circ\text{C}$. Процес розширення – адіабатний. Атмосферний тиск $B = 1$ бар.

Завдання 4. Розв'язати попереднє завдання, якщо витікання відбувається через сопло Лавалю при тих самих умовах.

Завдання 5. Перегріта водяна пара з $p_1 = 16$ бар і температурою $t_1 = 400^\circ\text{C}$ розширюється в соплі за адіабатою до $p_2 = 1$ бар. Кількість пари, що витікає із сопла, $M = 4,5$ кг/с.

ТЕМА 13. ДРОСЕЛЮВАННЯ ГАЗІВ І ПАРИ

Дроселюванням називається необоротний процес, у якому тиск при проходженні газу через отвір, що звужується, зменшується без здійснення зовнішньої роботи.

Дроселювання є необоротним процесом, при якому завжди відбувається збільшення ентропії і зменшення працездатності робочого тіла. *Ентальпія* в результаті процесу дроселювання не змінюється:

$$h_1 - h_2 = 0; h_1 = h_2. \quad (13.1)$$

Оскільки ентальпія ідеального газу є однозначною функцією температури, то і температура в результаті дроселювання ідеального газу залишається незмінною.

У результаті процесу дроселювання реального газу ентальпія для початкових і кінцевих значень залишається однаковою, ентропія та об'єм збільшуються, тиск падає, а температура може збільшуватися, зменшуватися чи в окремому випадку залишитися без зміни.

Розрізняють ефекти дроселювання: *диференційний температурний*, при якому тиск і температура змінюються на нескінченно малу величину, та *інтегральний температурний*, коли тиск і температура змінюються на кінцеву величину.

Якщо тиск газу зменшується на нескінченно малу величину dp , то відбувається нескінченно мала зміна температури (*диференційний ефект дроселювання*):

$$dT_h = \alpha_h dp_h; \alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h. \quad (13.2)$$

Дроселювання при кінцевих перепадах тиску називають *інтегральним ефектом дроселювання Джоуля-Томсона*:

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{p-v}}{c_p} dp. \quad (13.3)$$

Дослідження процесу дроселювання водяної пари дуже наочно проводиться за допомогою hs -діаграми водяної пари, у якій процес дроселювання можна умовно зобразити горизонтальною лінією, оскільки горизонталь є тільки допоміжна

побудова для знаходження параметрів стану кінцевої точки і не має фізичного сенсу в проміжних точках.

Якщо піддається дроселюванню перегріта пара, то тиск і температура зменшуються, а об'єм, ентропія і ступінь перегріву збільшуються. При дроселюванні пари високого тиску і невеликого перегріву пара спочатку переходить у суху насичену, потім у вологу, потім знову в суху насичену і знову в перегріту. При дроселюванні киплячої рідини вона частково випаровується із збільшенням ступеня сухості. При дроселюванні вологої пари ступінь сухості її збільшується.

Тестові завдання

1 Як змінюється ентальпія робочого тіла при дроселюванні?

- a) $dh < 0$;
- б) $dh > 0$;
- в) $dh = 0$.

2 Як змінюється тиск робочого тіла при дроселюванні?

- a) $dp < 0$;
- б) $dp > 0$;
- в) $dp = 0$.

3 Що відбувається з працездатністю водяної пари після дроселювання?

- a) працездатність збільшується;
- б) зменшується;
- в) залишається незмінною.

4 Як визначається диференціальний дросельний ефект?

- a) $\alpha_h = \left(\frac{dT}{dp} \right)_h$;
- б) $\alpha_h = \left(\frac{dP}{dT} \right)_h$;

$$в) \alpha_h = \left(\frac{dv}{dT} \right)_p.$$

5 Як дроселюється водяна пара?

- а) з підвищенням температури;
- б) зі зниженням температури;
- в) без зміни температури.

6 Як впливає дроселювання на тиск водяної пари?

- а) зменшується;
- б) зростає;
- в) не змінюється.

7 Як змінюється ентропія робочого тіла при дроселюванні?

- а) зменшується;
- б) зростає;
- в) не змінюється.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Водяна пара при $p_1 = 18$ бар і температурі $t_1 = 250$ °С дроселюється до $p_2 = 10$ бар.

Визначити температуру пари наприкінці процесу дроселювання, а також зміну перегріву пари.

Завдання 2. Водяна пара при $p_1 = 12$ бар і $x_1 = 0,9$ дроселюється до $p_2 = 1$ бар.

Визначити кінцеву сухість пари.

Завдання 3. До якого тиску необхідно дроселювати пару при $p_1 = 60$ бар і $x_1 = 0,96$, щоб вона стала сухою насиченою?

Завдання 4. Пара при тиску $p_1 = 20$ бар і $x_1 = 0,9$ дроселюється до $p_2 = 8$ бар.

Визначити стан пари наприкінці процесу дроселювання.

Завдання 5. Водяна пара при $p_1 = 100$ бар і температурі $t_1 = 320$ °С дроселюється до $p_2 = 30$ бар.

Визначити параметри кінцевого стану і зміну температури пари.

ТЕМА 14. ЗМІШУВАННЯ ГАЗІВ І ПАРИ

Усі способи утворення сумішей газів можна розділити на три групи: змішування газів при постійному об'ємі; змішування газових потоків; змішування газів при наповненні резервуара.

Змішування газів при постійному об'ємі полягає в тому, що декілька газів з тисками p_1, p_2, p_3, \dots і температурами T_1, T_2, T_3, \dots займають різні об'єми V_1, V_2, V_3, \dots . Після видалення перегородок об'єм суміші, що утворилася, буде дорівнювати сумі об'ємів змішуваних газів:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (14.1)$$

Маса суміші дорівнює сумі мас газів, що утворюють газову суміш:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots \quad (14.2)$$

Оскільки гази при змішуванні не здійснюють зовнішньої роботи, то внутрішня енергія суміші газів, згідно з першим законом термодинаміки, дорівнює в окремому випадку для ідеальних газів сумі внутрішніх енергій окремих газів до змішування:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + \dots \quad (14.3)$$

Температура становить

$$T = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3 + \dots}{p_1 V_1 / T_1 + p_2 V_2 / T_2 + p_3 V_3 / T_3 + \dots} \quad (14.4)$$

Тиск становить

$$p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3 + \dots}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots} \quad (14.5)$$

Знаючи температуру, об'єм і тиск, можна визначити решту величин і параметрів суміші газів, користуючись рівняннями для суміші ідеальних газів.

Змішування газів утворюється в результаті з'єднання декількох потоків в одному каналі, наприклад змішування газів, що відходять з декількох казанів в одному димарі. Нехай по першому трубопроводу надходить M_1 , кг, газу з параметрами p_1 , V_1 , T_1 ; по другому – M_2 , кг, газу з параметрами p_2 , V_2 , T_2 ; по третьому – M_3 , кг, газу з параметрами p_3 , V_3 , T_3 .

Температура розраховується за формулою

$$T = \frac{g_1 c_{p1} T_1 + g_2 c_{p2} T_2 + g_3 c_{p3} T_3 + \dots}{g_1 c_{p1} + g_2 c_{p2} + g_3 c_{p3} + \dots}, \quad (14.6)$$

де g_1 , g_2 , g_3 — масові частки.

Об'єм суміші ідеальних газів розраховується за рівнянням

$$\begin{aligned} V &= \frac{MRT}{p} = \left(\frac{T}{p} \right) (M_1 R_1 + M_2 R_2 + M_3 R_3 + \dots) = \\ &= \left(\frac{T}{p} \right) \left(\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \frac{p_3 V_3}{T_3} + \dots \right) \end{aligned} \quad (14.7)$$

Змішування ідеальних газів при наповненні резервуарів. У резервуарі є M , кг, газу з параметрами p , V , T . По трубопроводу в нього надходить через вентиль А інший газ з параметрами p_1 , V_1 , T_1 . Нехай у резервуар надходить m , кг, газу, після чого вентиль закривається і в резервуарі утворюється суміш газів з об'ємом V . Процес змішування газів необоротний.

Температура в цьому випадку розраховується за рівнянням

$$T = \frac{g_1 c_{v1} T_1 + g_2 c_{v2} T_2}{g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2}}, \quad (14.8)$$

де g_1 , g_2 — масові частки.

Якщо змішати декілька різних газів при параметрах p , T суміші, то ентропія суміші не буде дорівнювати сумі ентропії окремих компонентів, узятих при тиску і температурі суміші, а

буде більше на деяку величину, рівну зміні ентропії при змішуванні.

$$(s_{CM})_{p,T} = \sum_{i=1}^n g_i (s_i)_{p,T} + \sum_{i=1}^n g_i R_i \ln \frac{1}{r_i}; \quad (14.9)$$

$$(s_{CM})_{p,T} = \sum_{i=1}^n g_i (s_i)_{p,T} + \sum_{i=1}^n g_i R_i \ln \frac{\mu_i}{g_i \mu_{CM}}. \quad (14.10)$$

Тестові завдання

1 Як змінюється працездатність термодинамічної системи при змішуванні?

- а) зменшується;
- б) зростає;
- в) не змінюється.

2 Від чого залежить зміна ентропії системи при змішуванні газів (або рідин)?

- а) від початкової температури;
- б) від початкового тиску;
- в) від складу суміші;
- г) від маси компонентів.

3 Як обчислюється температура газової суміші, якщо процес змішування відбувається при постійному об'ємі?

а) $T = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3 + \dots}{p_1 V_1 / T_1 + p_2 V_2 / T_2 + p_3 V_3 / T_3 + \dots};$

б) $T = \frac{\sum g_i c_{pi} T_i}{\sum g_i c_{pi}};$

в) $T = \frac{g_1 c_{v1} T_1 + k_2 g_2 c_{v2} T_2}{g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2}}.$

4 Як обчислюється тиск газової суміші, якщо процес змішування відбувається при постійному об'ємі?

$$a) p = \frac{\sum g_i c_{vi} p_i}{\sum g_i c_{vi}};$$

$$б) p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}{V_1 + V_2 + V_3};$$

$$в) p = \frac{\sum g_i c_{pi} p_i}{\sum g_i c_{pi}}.$$

5 Як обчислюється температура газової суміші, якщо процес змішування відбувається при змішуванні декількох потоків?

$$a) T = \frac{\sum g_i c_{vi} T_i}{\sum g_i c_{vi}};$$

$$б) T = \frac{g_1 c_{p1} T_1 + g_2 c_{p2} T_2 + g_3 c_{p3} T_3}{g_1 c_{p1} + g_2 c_{p2} + g_3 c_{p3}};$$

$$в) T = \frac{g_1 c_{v1} T_1 + k_2 g_2 c_{v2} T_2}{g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2}}.$$

6 Як обчислюється температура газової суміші, якщо процес змішування відбувається при наповненні резервуара?

$$a) T = \frac{\sum g_i c_{vi} T_i}{\sum g_i c_{vi}};$$

$$б) T = \frac{\sum g_i c_{pi} T_i}{\sum g_i c_{pi}};$$

$$в) T = \frac{g_1 c_{v1} T_1 + g_2 c_{v2} T_2}{g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2}}.$$

Розрахункові завдання

Завдання 1. У трьох резервуарах, які з'єднані між собою трубопроводами, знаходяться: кисень з $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$ при $T_1 = 300 \text{ К}$ і $p_1 = 2 \text{ бар}$; повітря з $V_2 = 3 \text{ м}^3$ при $T_2 = 350 \text{ К}$ і $p_2 = 4 \text{ бар}$; оксид вуглецю $V_3 = 5,5 \text{ м}^3$ при $T_3 = 400 \text{ К}$ і $p_3 = 6 \text{ бар}$.

Визначити температуру й тиск суміші газів при відкритих засувках.

Завдання 2. У каналі змішуються гази, що надходить з трьох трубопроводів: 2 кг повітря при $T_1 = 500 \text{ К}$ і $p_1 = 2 \text{ бар}$; 3 кг вуглекислого газу при $T_1 = 400 \text{ К}$ і $p_2 = 2 \text{ бар}$; 5 кг кисню при $T_3 = 300 \text{ К}$ і $p_3 = 3 \text{ бар}$.

Визначити температуру і питомий об'єм суміші при тиску 1 бар і постійних теплоємностях.

Завдання 3. У резервуарі об'ємом 5 м^3 знаходиться кисень $T_1 = 320 \text{ К}$ і $p_1 = 3 \text{ бар}$; по трубопроводу до нього подається $0,6 \text{ м}^3$ вуглекислого газу при $T_1 = 400 \text{ К}$ і $p_2 = 12 \text{ бар}$.

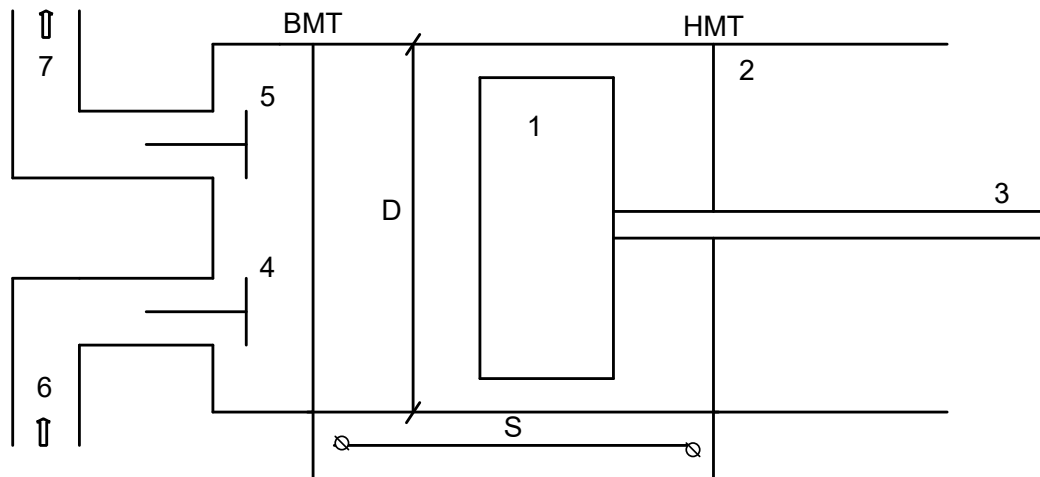
При постійній теплоємності визначити параметри стану суміші газів.

Завдання 4. Визначити ентропію 1 кг газової суміші, що складається з азоту і кисню при $p = 5 \text{ бар}$ і температурі $T = 673 \text{ К}$. Масові частки азоту і кисню: $g_{N_2} = 0,4$; $g_{O_2} = 0,6$. Гази вважати ідеальними. Прийняти, що ентропія азоту і кисню дорівнюють нулю при параметрах $T_0 = 273 \text{ К}$ і $p_0 = 1 \text{ бар}$.

Завдання 5. При температурі 20°С визначити мінімальну теоретичну роботу розділення 1 кг газової суміші, що складається з 30 об'ємних часток двоокису вуглецю і 70 об'ємних часток азоту. Гази вважати ідеальними.

ТЕМА 15. КОМПРЕСІЯ ГАЗІВ

Поршневий компресор відноситься до нагнітачів об'ємної дії. Робота таких машин основана на всмоктуванні і витіснення повітря робочим органом компресора (рисунок 15.1).



1 – поршень; 2 – циліндр; 3 – кривошипно-шатунний механізм;
 4 – впускний клапан; 5 – нагнітальний клапан; 6 – впускний патрубок; 7 – нагнітальний патрубок; ВМТ, НМТ – верхня та нижня мертві точки; D – діаметр циліндра; S – хід поршня

Рисунок 15.1 – Схема поршневого компресора

Процес стиснення газу в компресорі залежно від умов теплообміну між робочим тілом і стінками циліндра може здійснюватися по ізотермі, адіабаті і політропі. Стиснення по кожному з трьох процесів дає різну величину витраченої роботи.

Приклад індикаторної діаграми для реального компресора наведено на рисунку 15.2. Позначення на діаграмі:

- 1-2 – стиснення повітря в циліндрі;
- 2-3 – виштовхування в магістраль;
- 3-4 – розширення повітря що залишилося у шкідливому просторі;
- 4-1 – усмоктування нового заряду повітря.

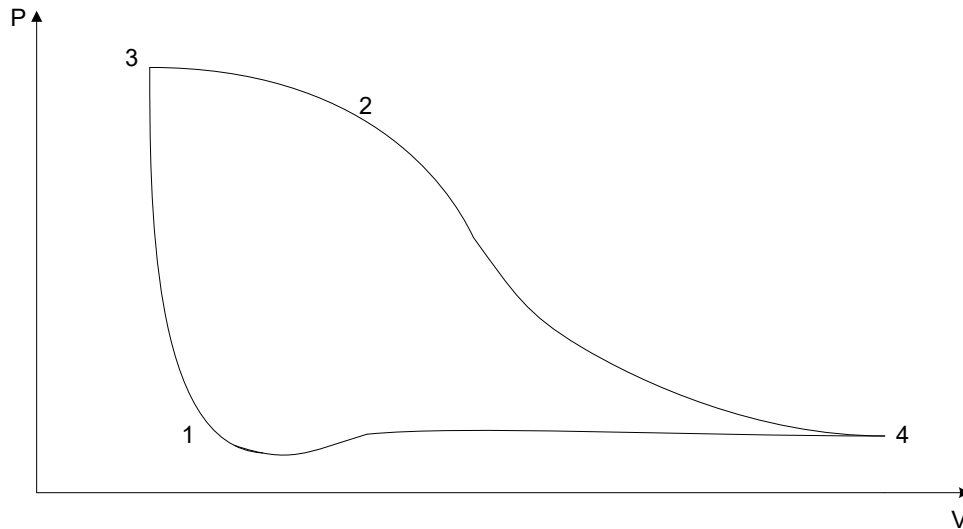


Рисунок 15.2 – Індикаторна діаграма

Робота для привода компресора *при ізотермічному процесі* дорівнює роботі ізотермічного стиснення:

$$l_{из} = -p_1 v_1 \ln(p_2/p_1). \quad (15.1)$$

При адіабатному стисненні робота на привод компресора складає:

$$l_{ад} = -\frac{1}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (15.2)$$

Для компресора з *політропним процесом стиснення* робота, що витрачається на отримання 1 кг стисненого газу, дорівнює:

$$l_{п} = -\frac{m}{m-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (15.3)$$

Щоб уникнути удару поршня об кришку компресора в положенні верхньої мертвої точки (ВМТ), циліндри виготовляються з «мертвим» (шкідливим) простором, заповненим газом. Наявність «мертвого» простору призводить до того, що не весь робочий об'єм заповнюється свіжим зарядом робочого тіла.

Оцінюється об'єм «мертвого простору» звичайно в частках від робочого об'єму циліндра:

$$a = V_M / V_h, \quad (15.4)$$

де V_M – об'єм «мертвого» простору;
 V_h – робочий об'єм компресора.

Величину, що характеризує ступінь повноти використання робочого об'єму циліндра, називають об'ємним ККД компресора:

$$\eta_{об} = v_{вс} / v_h, \quad (15.5)$$

де $V_{вс}$ – об'єм повітря, що надходить за такт усмоктування.

Теоретична робота ідеального компресора є мінімальною. Дійсну роботу реального компресора визначають за допомогою ізотермічного або *адіабатного ККД і механічного ККД*:

$$\eta_{із} = \frac{l_{із}}{l_k}; \quad (15.6)$$

$$\eta_{ад} = \frac{l_{ад}}{l_k}, \quad (15.7)$$

де $l_{із}$, $l_{ад}$ – відповідно теоретична робота компресора при ізотермічному та адіабатному стисненні;
 l_k – дійсна робота компресора.

Механічний ККД враховує механічні втрати в компресорі. Добуток ізотермічного або адіабатного ККД на механічний називають ефективним ККД компресора η_k .

Теоретична потужність двигуна N , кВт, для привода компресора визначається за формулою

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000}, \quad (15.8)$$

де L_0 – теоретична робота компресора, Дж/год.

Дійсна потужність двигуна для стиснення M , кг/год, газу визначається за формулою

$$N = \frac{L_0}{3600 \cdot 1000 \eta_K}. \quad (15.9)$$

Для отримання газу високого тиску застосовують *багатоступеневі компресори*, у яких стиснення газу здійснюється в декількох послідовно сполучених циліндрах з проміжним його охолодженням після кожного стиснення.

На рисунку 15.3 зображені процеси стиснення у триступеновому компресорі: 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6 – процеси адіабатного стиснення в кожному циліндрі компресора; 2 – 3, 4 – 5 – процеси ізобарного охолодження газу в спеціальних холодильниках.

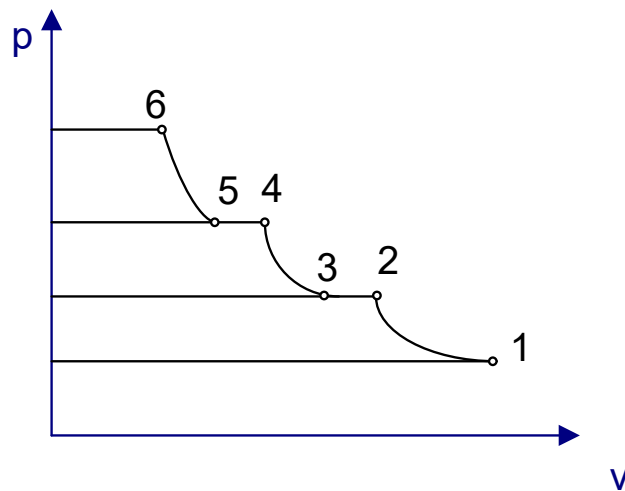


Рисунок 15.3 – Процеси в триступеновому компресорі

Для триступенового компресора: $t_1 = t_3 = t_5$. Температури газу на виході кожного ступеня також рівні між собою: $t_2 = t_4 = t_6$.

Найбільш доцільним є багатоступеневе стиснення у випадку, якщо відношення тисків у кожному ступені приймається однаковим:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_2} = \frac{p_6}{p_4} = x. \quad (15.10)$$

Таким чином, *відношення тисків* у кожному ступені триступеневого компресора:

$$x = \sqrt[3]{\frac{p_6}{p_1}}. \quad (15.11)$$

Тестові завдання

1 Як визначається об'ємний ККД компресора?

- а) $\eta_{об} = v_h / v_{вс}$;
- б) $\eta_{об} = v_{вп} / v_{вс}$;
- в) $\eta_{об} = v_{вс} / v_h$.

2 Яким рівнянням визначається робота на привод компресора при ізотермічному стисненні?

- а) $l = -\frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$;
- б) $l = -p_1 v_1 \ln(p_2 / p_1)$;
- в) $l = k l_{см}$;
- г) $l = -\frac{n}{n-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$;

д) $l = l_{cm}$;

е) $l = n l_{cm}$.

3 Яким рівнянням визначається робота на привод компресора при адіабатному стисненні?

а) $l = -\frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$;

б) $l = -p_1 v_1 \ln(p_2/p_1)$;

в) $l = k l_{cm}$;

г) $l = -\frac{n}{n-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$;

д) $l = l_{cm}$;

е) $l = n l_{cm}$.

4 Яким рівнянням визначається робота на привод компресора при політропному стисненні?

а) $l = -\frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$;

б) $l = -p_1 v_1 \ln(p_2/p_1)$;

в) $l = k l_{cm}$;

г) $l = -\frac{n}{n-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$;

д) $l = l_{cm}$;

е) $l = n l_{cm}$.

5 Які лінії індикаторної діаграми компресора не зображують термодинамічні процеси?

- а) лінія всмоктування;
- б) лінія стиснення;
- в) лінія нагнітання.

6 Що таке внутрішній індикаторний ККД компресора?

- а) $\eta_{із} = l_{із} / l_{д}$;
- б) $\eta_{ад} = l_{ад} / l_{д}$;
- в) $\eta_{п} = l_{д} / l_{п}$.

7 Що таке ізотермічний ККД компресора?

- а) $\eta_{із} = l_{із} / l_{к}$;
- б) $\eta_{ад} = l_{ад} / l_{к}$;
- в) $\eta_{к} = \eta_{із} / \eta_{мех}$.

8 Що таке адіабатний ККД компресора?

- а) $\eta_{із} = l_{із} / l_{к}$;
- б) $\eta_{ад} = l_{ад} / l_{к}$;
- в) $\eta_{к} = \eta_{ад} / \eta_{мех}$.

Розрахункові завдання

Завдання 1. Компресор усмоктує 100 м³/год повітря при тиску $p_1 = 1$ бар і температурі $t_1 = 27$ °С. Кінцевий тиск повітря складає 8 бар.

Визначити теоретичну потужність двигуна для привода компресора і витрату охолоджувальної води, якщо температура її підвищується на 13°С. Розрахунки провести для ізотермічного, адіабатного і політропного стиснення. Показник політропи дорівнює 1,2. Теплоємність води прийняти 4,19 кДж/кг.

Завдання 2. Відносна величина шкідливого простору одноступеневого поршневого компресора складає 5 %. Тиск повітря на вході компресора $p_1 = 1$ бар.

Визначити граничний тиск нагнітання, при якому продуктивність компресора дорівнюватиме нулю. Процес

розширення повітря, що знаходиться у шкідливому просторі, вважати адіабатним.

Завдання 3. Повітря при тиску 1 бар і температурі 20 °С повинно бути стиснене за адіабатою до тиску 8 бар.

Визначити температуру в кінці процесу стиснення і величину об'ємного ККД:

а) для одноступеневого компресора;

б) для двоступеневого компресора з проміжним холодильником, у якому повітря охолоджується до початкової температури.

Відносна величина шкідливого простору складає 8 %. Отримані результати звести до таблиці та порівняти.

Завдання 4. Визначити теоретичну роботу на привод одноступеневого і триступеневого компресорів при стисненні повітря до 125 бар. Початковий тиск 1 бар і температура 300 °С. Показник політропи для всіх ступенів прийняти 1,2. Визначити величину роботи на 1 м³ повітря і температуру наприкінці стиснення в одноступеневому і триступеневому компресорах.

Завдання 5. Для двигуна необхідно використовувати триступеневий компресор, що подає 250 кг/год повітря при тиску 80 бар.

Визначити теоретичну потужність компресора. Стиснення вважати адіабатним. На початку стиснення; $p_1 = 0,95$ бар і $t_1 = 17$ °С.

ПИТАННЯ ДО ЗАЛІКУ

- 1 Чим відрізняються реальні гази від ідеальних?
- 2 Що таке коефіцієнт стиснення?
- 3 Рівняння Ван-дер-Ваальсу.
- 4 Поясніть значення кореня об'єму при різних станах речовини, одержані з рівняння Ван-дер-Ваальса.
- 5 Рівняння Ван-дер-Ваальса в приведених параметрах.
- 6 Закон відповідних станів.
- 7 Рівняння стану М.П. Вукаловича та І.І. Новікова.
- 8 Що таке коефіцієнт ізотермічного стиснення, коефіцієнт термічного розширення тіла, термічний коефіцієнт тиску?
- 9 Як пов'язані між собою термічні коефіцієнти?

10 Що розуміється під внутрішньою енергією ідеального й реального газів? Від яких параметрів стану залежить внутрішня енергія реального і ідеального газів?

11 Виведення рівняння роботи в довільному процесі.

12 Дати визначення основних термодинамічних процесів. Написати рівняння основних процесів.

13 Написати формули роботи зміни об'єму газу для кожного процесу.

14 Який процес називається політропним?

15 Написати рівняння політропи і вказати, у яких межах змінюється показник політропи.

16 Написати рівняння теплоємності політропного процесу і показати, що з даного рівняння можна одержати теплоємності при всіх основних термодинамічних процесах.

17 У яких політропних процесах внутрішня енергія зменшується і в яких збільшується?

18 У яких політропних процесах теплота до газу підводиться і в яких процесах відводиться?

19 За якими рівняннями обчислюється зміна ентропії в ізохорному, ізобарному, ізотермічному, адіабатному і політропних процесах?

20 Основні формулювання другого закону термодинаміки.

21 Що називається круговим процесом, або циклом?

22 Які бувають кругові процеси (цикли)? Дайте їх характеристику.

23 Що називається термічним ККД? За яких умов термічний ККД циклу може бути рівний одиниці?

24 Описати оборотний цикл Карно. Виведення виразу для термічного ККД оборотного циклу Карно.

25 Від яких параметрів залежить термічний ККД оборотного циклу Карно?

26 Чи може бути термічний ККД оборотного циклу Карно дорівнювати одиниці? Чи можна одержати термічний ККД циклу теплового двигуна більше, ніж термічний ККД циклу Карно?

27 Які машини працюють за зворотним циклом Карно? Що таке холодильний коефіцієнт і як він визначається?

28 Суть теореми Карно.

29 Властивість оборотних циклів Карно і перший інтеграл Клаузіуса.

30 Властивості необоротних циклів Карно і другий інтеграл Клаузіуса.

31 Графічне зображення узагальненого (регенеративного) циклу Карно в Ts-діаграмі і його ККД.

32 Як змінюється ентропія в замкнутій адіабатній системі, якщо в ній протікають оборотні і необоротні процеси?

33 Довести, що в необоротних процесах працездатність тіла зменшується, а ентропія збільшується.

34 Як визначається максимальна корисна робота робочого тіла?

35 Що таке ексергія?

36 Статистичний характер другого закону термодинаміки.

37 Теорія Больцмана. Рівняння Больцмана.

38 Як визначається середньоінтегральна температура? Вираз термічного ККД довільного циклу через середньоінтегральні температури.

39 Термодинамічна тотожність.

40 Якими особливостями володіють термодинамічні функції? Які термодинамічні функції вважаються основними?

41 Якими незалежними змінними визначається кожна з основних термодинамічних функцій?

42 Що таке ізохорно-ізотермічний потенціал і зв'язана енергія?

43 Фізичний сенс ізохорно-ізотермічного потенціалу.

44 З яких величин складається загальна енергія системи?

45 Які величини називаються термодинамічними потенціалами?

46 Що є хімічним потенціалом?

47 Який стан називається стабільним, лабільним, метастабільним?

48 Які умови необхідно здійснювати для стійкої рівноваги термодинамічної системи?

49 Умови рівноваги однорідної системи.

50 Умови рівноваги декількох фаз речовини.

51 Фазові діаграми.

52 Рівняння Клапейрона – Клаузіуса.

53 Які методи застосовують для досліджень термодинамічних процесів водяної пари?

54 За якими рівняннями для водяної пари визначають в ізохорному процесі підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії, роботу, ступінь сухості?

55 За якими рівняннями для водяної пари визначають зміну внутрішньої енергії, зовнішню роботу, підведену теплоту і ступінь сухості в ізобарному процесі?

56 Як визначають зміну внутрішньої енергії, підведену теплоту і зовнішню роботу водяної пари в ізотермічному процесі?

57 Як зображаються основні процеси водяної пари на p - v -, T - s - і h - s -діаграмах?

58 Рівняння першого закону термодинаміки для потоку.

59 Рівняння нерозривності для потоку.

60 Які канали називаються соплами і дифузорами?

61 Швидкість закінчення ідеального газу при адіабатному процесі.

62 Секундна витрата ідеального газу.

63 Критичне відношення тиску і його визначення.

64 Рівняння для визначення критичної швидкості.

65 Як визначається швидкість звуку?

66 Що називається вологим повітрям?

67 Що називається насиченим і ненасиченим вологим повітрям?

68 Закон Дальтона стосовно вологого повітря.

69 Що називається абсолютною вологістю?

70 Що називається вологовмістом вологого повітря? У яких межах може змінюватися вологовміст?

71 Що називається відносною вологістю повітря?

72 Що називається температурою точки роси?

73 Як визначається густина вологого повітря?

74 Як визначається газова постійна вологого повітря?

75 Як визначається ентальпія вологого повітря?

76 Описати h - d -діаграму вологого повітря.

77 Як зображаються основні процеси вологого повітря в h - d -діаграмі?

78 Який процес називають дроселюванням? Сфери застосування дроселювання.

79 Рівняння адіабатного процесу дроселювання.

80 Як змінюється температура ідеального газу при дроселюванні?

81 Ефект Джоуля-Томпсона та його рівняння.

82 Диференціальний та інтегральний ефекти дроселювання.

83 Дослідження дроселювання водяної пари за h_s -діаграмою.

84 Точка та температура інверсії.

85 Визначення температури і тиску суміші газів при постійному об'ємі.

86 Температура суміші газів при наповненні резервуара.

87 Температура та об'єм при змішуванні газових потоків.

88 Поясніть причину зміни ентропії при змішуванні газів.

89 Визначення ентропії газової суміші.

90 Компресор: поняття, призначення.

91 Пояснити принцип роботи одноступеневого компресора.

92 Які процеси можливі при стисненні газу в компресорі? Який процес є найбільш вигідним?

93 Якими рівняннями визначається робота на привод компресора при ізотермічному, адіабатному і політропному процесах стисненні?

94 Дійсна індикаторна діаграма одноступеневого компресора.

95 «Мертвий» простір. Як впливає об'єм «мертвого» простору на процес стиснення газу?

96 Об'ємний ККД компресора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Технічна термодинаміка: Робоча програма, методичні вказівки, завдання до виконання контрольних робіт. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. – 58 с.

2 Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 447 с.

3 Техническая термодинамика: Учеб. пособие для ВУЗов / В.И. Крутов и др. // Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высш. шк., 1991. – 344 с.

4 Бурлянда О.Ф. Технічна термодинаміка. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.

5 Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика: Учеб. пособие для ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.

6 Сборник задач по технической термодинамике / Андрианова Т.Н., Дзампов Б.В., Зубарев В.Н., Ремизов С.А. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 206 с.

7 Жуховицкий Д.Л. Сборник задач по технической термодинамике: Учеб. пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 98 с.

8 Ривкин С. Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С. Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Фізичні постійні деяких газів

Газ	Хімічна формула	Молекулярна маса, $\frac{кг}{к моль}$	Газова постійна R , $\frac{Дж}{кг \cdot К}$
Кисень	O_2	32	259,8

Азот	N_2	28,026	296,6
Повітря	-	28,96	287,04
Вуглекислий газ	CO_2	44,01	188,9
Водяна пара	H_2O	18,016	461,5

Таблиця А.2 – Мольні теплоємності і показник адиабати при постійному об'ємі і постійному тиску газів

Атомність газу	$\frac{\mu c_v,}{кДж}$ $кмоль \cdot K$	$\frac{\mu c_p,}{кДж}$ $кмоль \cdot K$	k
Одноатомний	12,5	20,8	1,67
Двохатомний	20,8	29,1	1,4
Трьох- і багатоатомний	29,1	37,4	1,33

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Середня масова теплоємність газів при постійному тиску

У кілоджоулях на кілограм-кельвін

$t, ^\circ C$	O_2	N_2	CO_2	H_2O
0	0,9148	1,0304	0,8148	1,8594
100	0,9232	1,0316	0,8658	1,8728

200	0,9353	1,0346	0,9102	1,8937
300	0,9500	1,0400	0,9487	1,9192
400	0,9651	1,0475	0,9826	1,9477
500	0,9793	1,0567	1,0128	1,9778
600	0,9927	1,0668	1,0396	2,0092
700	1,0048	1,0777	1,0639	2,0419
800	1,0157	1,0881	1,0852	2,0754
900	1,0258	1,0982	1,1045	2,1097
1000	1,0350	1,1078	1,1225	2,1436
1100	1,0434	1,1170	1,1384	2,1771
1200	1,0509	1,1258	1,1530	2,2106
1300	1,0580	1,1342	1,1660	2,2429
1400	1,0647	1,1422	1,1782	2,2743
1500	1,0714	1,1497	1,1895	2,3048
1600	1,0773	1,1584	1,1995	2,3346
1700	1,0831	1,1631	1,2091	2,3630
1800	1,0886	1,1690	1,2179	2,3907
1900	1,0940	1,1748	1,2259	2,4166
2000	1,0990	1,1803	1,2334	2,4422

Таблиця Б.2 – Середня масова теплоємність газів
при постійному об'ємі

У кілоджоулях на кілограм-кельвін

$t, ^\circ C$	O_2	N_2	CO_2	H_2O
0	0,6548	0,7352	0,6259	1,3980
100	0,6632	0,7365	0,6770	1,4114
200	0,6753	0,7394	0,7214	1,4323
300	0,6900	0,7448	0,7599	1,4574

400	0,7051	0,7524	0,7938	1,4863
500	0,7193	0,7616	0,8240	1,5160
600	0,7327	0,7716	0,8508	1,5474
700	0,7448	0,7821	0,8746	1,5805
800	0,7557	0,7926	0,8964	1,6140
900	0,7658	0,8030	0,9157	1,6483
1000	0,7750	0,8127	0,9332	1,6823
1100	0,7834	0,8219	0,9496	1,7158
1200	0,7913	0,8307	0,9638	1,7488
1300	0,7984	0,8390	0,9772	1,7815
1400	0,8051	0,8470	0,9893	1,8129
1500	0,8114	0,8541	1,0006	1,8434
1600	0,8173	0,8612	1,0107	1,8728
1700	0,8231	0,8675	1,0203	1,9016
1800	0,8286	0,8738	1,0291	1,9293
1900	0,8340	0,8792	1,0371	1,9552
2000	0,8390	0,8847	1,0446	1,9804

Таблиця Б.3 – Середня об’ємна теплоємність газів
при постійному тиску

У кілоджоулях на кубічний метр-кельвін

$t, ^\circ\text{C}$	O_2	N_2	CO_2	H_2O
0	1,3059	1,2946	1,5998	1,4943
100	1,3176	1,2958	1,7003	1,5052
200	1,3352	1,2996	1,7873	1,5223
300	1,3561	1,3067	1,8627	1,5424

400	1,3775	1,3163	1,9297	1,5654
500	1,3980	1,3276	1,9887	1,5897
600	1,4168	1,3402	2,0411	1,6148
700	1,4344	1,3536	2,0884	1,6412
800	1,4499	1,3670	2,1311	1,6680
900	1,4645	1,3796	2,1692	1,6957
1000	1,4775	1,3917	2,2035	1,7229
1100	1,4892	1,4034	2,2349	1,7501
1200	1,5005	1,4143	2,2638	1,7769
1300	1,5106	1,4252	2,2898	1,8028
1400	1,5202	1,4348	2,3136	1,8280
1500	1,5294	1,4440	2,3354	1,8527
1600	1,5378	1,4528	2,3555	1,8761
1700	1,5462	1,4612	2,3743	1,8996
1800	1,5541	1,4687	2,3915	1,9213
1900	1,5617	1,4758	2,4074	1,9423
2000	1,5692	1,4825	2,4221	1,9628

Таблиця Б 3 – Середня об’ємна теплоємність газів при

постійному об’ємі, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$

$t, ^\circ\text{C}$	O_2	N_2	CO_2	H_2O
0	0,9349	0,9236	1,2288	1,1237
100	0,9466	0,9249	1,3293	1,1342
200	0,9642	0,9286	1,4164	1,1514
300	0,9852	0,9357	1,4918	1,1715

400	1,0065	0,9454	1,5587	1,1945
500	1,0270	0,9567	1,6178	1,2188
600	1,0459	0,9692	1,6701	1,2439
700	1,0634	0,9826	1,7174	1,2703
800	1,0789	0,9960	1,7601	1,2971
900	1,0936	1,0086	1,7982	1,3247
1000	1,1066	1,0207	1,8326	1,3519
1100	1,1183	1,0325	1,8640	1,3791
1200	1,1296	1,0434	1,8929	1,4059
1300	1,1396	1,0542	1,9188	1,4319
1400	1,1493	1,0639	1,9427	1,4570
1500	1,1585	1,0731	1,9644	1,4817
1600	1,1669	1,0819	1,9845	1,5052
1700	1,1752	1,0902	2,0034	1,5286
1800	1,1832	1,0978	2,0205	1,5504
1900	1,1907	1,1049	2,0365	1,5713
2000	1,1978	1,1116	2,0511	1,5918

