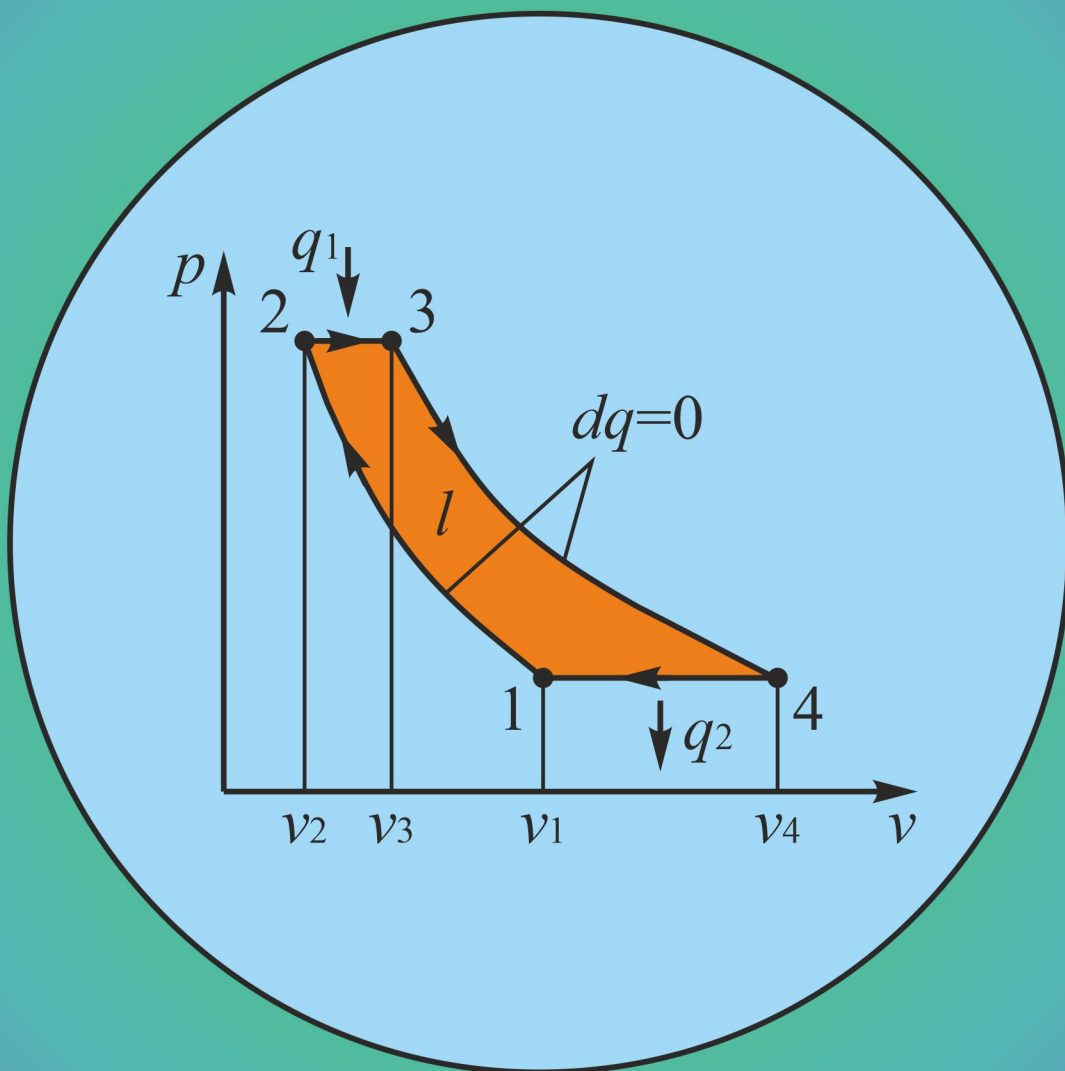


С.В. Фелоненко, І.С. Ільїна, О.П. Трофимова,
Ю.О. Комісаров, О.О. Бобришов

ПРАКТИКУМ З ТЕРМОДИНАМІКИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ПРАКТИКУМ З ТЕРМОДИНАМІКИ

Навчальний посібник

Дніпро
Журфонд
2024

УДК 536 (075.8)
П69

*Рекомендовано вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка»
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
спеціальності 184 Гірництво (протокол № 6 від 16.05.2024)*

Рецензенти:

О.М. Молчанов – д-р техн. наук, проф. (Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України);

І.Л. Коваленко – д-р техн. наук, проф. (Український державний університет науки і технологій).

Автори: **С.В. Фелоненко, І.С. Ільїна, О.П. Трофимова,
Ю.О. Комісаров, О.О. Бобришов.**

Розглянуто основні закони термодинаміки, термодинамічні процеси, цикли теплових та холодильних машин, властивості ідеальних газів і водяної пари, процеси витікання й дроселювання газів і парів. До кожної теми подано короткий огляд теоретичних відомостей про ідеальні й реальні гази, а також рекомендації до розв’язування задач з прикладами і задачі для самостійного розв’язування. Матеріали доповнено необхідними довідковими даними та питаннями для самоконтролю.

Видання адресовано здобувачам денної та заочної форм навчання спеціальності «Гірництво».

ISBN 978-966-934-585-1

© С.В. Фелоненко, І.С. Ільїна, О.П. Трофимова,
Ю.О. Комісаров, О.О. Бобришов, 2024
© НТУ «Дніпровська політехніка», 2024
© Видавництво «Журфонд», 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ПАРАМЕТРИ СТАНУ РОБОЧОГО ТІЛА. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ	6
1.1. Короткі теоретичні відомості	6
1.2. Методичні рекомендації до розв’язування задач.....	12
1.3. Питання для самоконтролю	12
1.4. Приклади розв’язування задач.....	13
1.5. Задачі.....	24
2. ГАЗОВІ СУМІШІ	27
2.1. Короткі теоретичні відомості	27
2.2. Методичні рекомендації до розв’язування задач.....	30
2.3. Питання для самоконтролю	30
2.4. Приклади розв’язування задач.....	30
2.5. Задачі.....	37
3. РОБОТА І ТЕПЛОТА. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ	40
3.1. Короткі теоретичні відомості	40
3.2. Методичні рекомендації до розв’язування задач.....	44
3.3. Питання для самоконтролю	45
4. ТЕПЛОЄМНІСТЬ ГАЗІВ	46
4.1. Короткі теоретичні відомості	46
4.2. Методичні рекомендації до розв’язування задач.....	48
4.3. Питання для самоконтролю	49
4.4. Приклади розв’язування задач.....	49
4.5. Задачі.....	53
5. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ	55
5.1. Короткі теоретичні відомості	55
5.2. Методичні рекомендації до розв’язування задач.....	55
5.3. Питання для самоконтролю	56
5.4. Приклади розв’язування задач.....	60
5.5. Задачі.....	96
6. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ	100
6.1. Короткі теоретичні відомості	100
6.1.1. Поняття про термодинамічний цикл.....	100
6.1.2. Цикл Карно.....	103
6.1.3. Теоретичні цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання....	103
6.1.4. Цикли газотурбінних установок (ГТУ).....	106
6.2. Методичні рекомендації до розв’язування задач.....	108
6.3. Питання для самоконтролю	109
6.4. Приклади розв’язування задач.....	109
6.5. Задачі.....	131
7. ТЕРМОДИНАМІКА РЕАЛЬНИХ ГАЗІВ	135
7.1. Короткі теоретичні відомості	135

7.1.1. Параметри і властивості водяної пари, діаграма $p-v$	136
7.1.2. Діаграма $T-s$ водяної пари.....	140
7.2. Визначення параметрів водяної пари	141
7.2.1. Таблиці теплофізичних властивостей водяної пари.....	141
7.2.2. Діаграма $h-s$ водяної пари.....	142
7.3. Основні термодинамічні процеси водяної пари.....	143
7.4. Методичні рекомендації до розв'язування задач.....	145
7.5. Питання для самоконтролю	145
7.6. Приклади розв'язування задач.....	145
7.7. Задачі.....	154
8. ТЕРМОДИНАМІКА ВИТІКАННЯ ТА ДРОСЕЛЮВАННЯ ГАЗІВ І ПАРІВ.....	158
8.1. Основні рівняння процесів течії	158
8.2. Методика розрахунку витікання ідеального газу.....	162
8.2.1. Витікання ідеального газу через звужувальне сопло і циліндричне сопло.....	162
8.2.2. Витікання ідеального газу через комбіноване сопло Лавалю.....	163
8.3. Методика розрахунку витікання реального газу (водяної пари).....	163
8.3.1. Витікання реального газу через звужувальне сопло і циліндричне сопло	163
8.3.2. Витікання реального газу через комбіноване сопло Лавалю	164
8.4. Дроселювання газу і пари	165
8.5. Методичні рекомендації до розв'язування задач.....	167
8.6. Питання для самоконтролю	167
8.7. Приклади розв'язування задач.....	168
8.8. Задачі.....	180
9. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ.....	182
9.1. Основні параметри стану вологого повітря.....	182
9.2. Психрометр.....	185
9.3. Визначення стану й параметрів вологого повітря.....	186
9.4. Питання для самоконтролю.....	188
9.5. Приклади розв'язування задач.....	189
9.6. Задачі.....	193
ЛІТЕРАТУРА	196
ДОДАТКИ	198

ВСТУП

Технічна термодинаміка вивчає теоретичні основи процесів перетворення теплової і механічної енергії в теплових двигунах, компресорах, холодильниках та в інших теплоенергетичних установках. Навчальна дисципліна „Термодинаміка” посідає важливе місце в програмі підготовки інженерних кадрів, зокрема спеціалістів у галузі гірництва. Засвоєння основ термодинаміки необхідне також у вивченні дисциплін „Установки для кондиціонування повітря шахт”, „Пневматичні установки гірничих підприємств”.

Зміст тем, висвітлених у посібнику, узгоджено з робочими програмами згаданих дисциплін. Подаючи приклади розв’язування задач, особливу увагу звертали на їхнє практичне застосування в технічних об’єктах. Подані приклади розв’язування задач відповідають структурі термодинаміки, що дозволяє спрогнозувати й оцінити ефективність різноманітних інноваційних заходів виконання газом корисної роботи. Для вибору напрямів розвитку енергетики це має істотне значення.

Мета навчального посібника – допомогти здобувачам у їхній роботі над засвоєнням основних розділів технічної термодинаміки. Це набуває особливої актуальності в умовах скорочення кількості аудиторних годин, що відводяться на вивчення дисциплін, пов’язаних з технічною термодинамікою. Матеріал посібника, без сумніву, полегшить здобувачам освіти вивчення теоретичних розділів курсу, а також зробить простішим застосування теорії до розв’язування задач.

Для економії часу пошуку потрібних літературних джерел у кожній темі практикуму подано короткі відомості з теорії та основні формули, необхідні для розв’язування задач, а також включено потрібні довідкові дані.

1. ПАРАМЕТРИ СТАНУ РОБОЧОГО ТІЛА. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Викладено короткі теоретичні відомості про основні поняття та визначення термодинаміки, одиниці вимірювання основних параметрів стану газів. Наведено методичку та приклади розв'язування задач по розрахунку параметрів за рівнянням стану ідеального газу.

Мета – сформулювати знання про основні поняття термодинаміки, про основні термодинамічні параметри стану газів, рівняння стану, що встановлює взаємозв'язок між ними.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- визначати основні параметри стану робочих тіл;
- переводити несистемні одиниці вимірювання основних параметрів стану газів в систему СІ;
- вирізняти відмінності ідеальних газів від реальних;
- користуватися рівнянням стану ідеальних газів.

1.1. Короткі теоретичні відомості

Об'єктом вивчення у технічній термодинаміці є термодинамічна система, що являє собою сукупність матеріальних тіл, замкнених в будь-яких границях і знаходяться в тепловій і механічній взаємодіях між собою, а також навколишнім середовищем. Термодинамічна система містить у собі робочі тіла (гази, повітря, пари).

Прикладом такої системи є газ, який знаходиться в циліндрі з поршнем. Границею системи є циліндр і поршень. До навколишнього середовища можна віднести повітря, яке оточує циліндр з поршнем, стіни приміщення де вони знаходяться та інше.

Термодинамічна система, що не може обмінюватися енергією і речовиною з навколишнім середовищем, називається ізолюваною. Термодинамічна система, що може обмінюватися енергією з навколишнім середовищем, а речовиною ні, називається закритою.

Термодинамічні системи, які можуть обмінюватися енергією і речовиною з навколишнім середовищем, називаються відкритими.

Під ідеальним газом слід розуміти уявний газ, у якого відсутні сили взаємодії між молекулами і їхній об'єм дорівнює нулю.

Такий газ у своїх змінах підпорядковується законам Бойля-Маріотта, Гей-Люссака і Шарля.

В технічній термодинаміці робочими тілами називають речовини за допомогою яких відбувається взаємне перетворення теплоти і роботи. До них відносяться газоподібні тіла, внаслідок їх здатності до більшого розширення при нагріванні (гази, повітря, пари).

Величини, що характеризують фізичний стан робочого тіла, називають термодинамічними параметрами. До основних параметрів стану, що піддаються до безпосереднього виміру, відносяться тиск p , питомий об'єм v , температура T . Вони називаються термічними параметрами.

До параметрів стану також відносяться внутрішня енергія U , ентальпія H і ентропія S , які називаються калоричними параметрами.

Термічні параметри:

Питомий об'єм

Питомим об'ємом v називається об'єм, який займає 1 кг даної речовини

$$v = \frac{V}{M}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (1.1)$$

де V – об'єм, м^3 , M – маса речовини, кг .

Величина, обернена питомому об'ємові називається густиною

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}, \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (1.2)$$

З рівняння (1.2): $V = M \cdot v = \frac{M}{\rho}, \text{ м}^3$ і $M = \rho \cdot V = \frac{V}{v}, \text{ кг}$.

Питомий об'єм вимірюється п'єзометром.

Тиск

Тиск є силою, яка припадає на одиницю поверхні .

Якщо позначити через p тиск газу, а силу, яка припадає на поверхню S , буквою F , то

$$p = \frac{F}{S}, \text{ Па}.$$

У міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю тиску прийнятий паскаль (Па), який дорівнює силі, виміряній у н'ютонах (Н) і віднесеній до одиниці поверхні (м^2), тобто $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$. Величина 1 Па для багатьох технічних вимірювань дуже мала, тому застосовують більш масштабні одиниці: кілопаскаль або мегапаскаль. $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$, $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$.

Слід розрізняти поняття: абсолютний тиск, надлишковий тиск і вакуум (розрідження).

Нулем відліку абсолютного (істинного) тиску є абсолютний вакуум.

Нулем відліку надлишкового тиску служить тиск навколишнього середовища, в якому знаходиться вимірювальний прилад – манометр. Тиск навколишнього середовища – це атмосферний тиск.

Звичайно на практиці вимірюють (рис. 1.1):

а) абсолютний атмосферний (барометричний) тиск p_0 (прилади, які вимірюють атмосферний тиск, називаються барометрами);

б) надлишковий (манометровий) тиск p_n , який перевищує тиск навколишнього середовища (атмосферний) і вимірюється манометром;

в) розрідження або вакуум p_v , тобто різницю між атмосферним і абсолютним тиском (прилади для вимірювання розрідження називаються вакуумметрами, за їх показами судять, наскільки тиск у вимірюваному середовищі менший від тиску навколишнього середовища (атмосферного)).

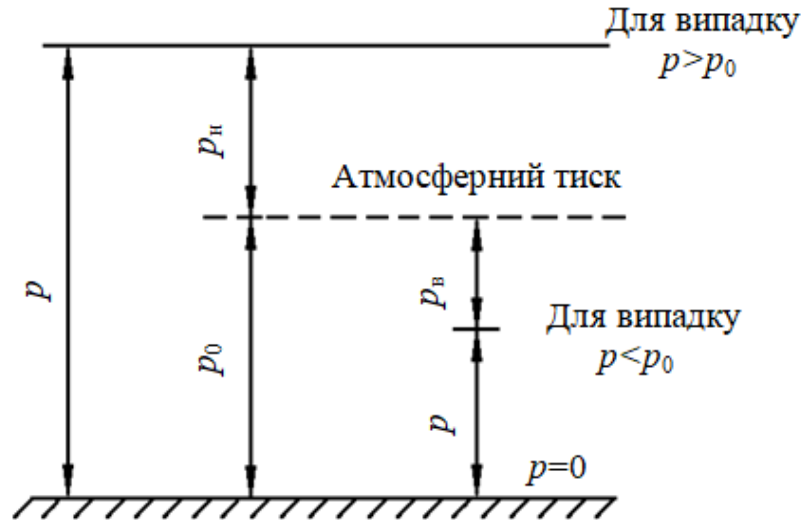


Рисунок 1.1 – Графічне зображення початків відліку тиску

При вимірюванні надлишкового тиску і розрідження початком відліку служить тиск навколишнього середовища (атмосферний), який не є постійною величиною, тому ці величини не можуть бути параметрами стану.

Таким чином виходить, що абсолютний тиск може бути розрахований за формулами

$$\begin{aligned} p &= p_0 + p_n; \\ p &= p_0 - p_v. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Співвідношення між одиницями тиску різних систем наведені в табл. 1.1. Коефіцієнти перерахунку подані з точністю до трьох значущих цифр, що цілком достатньо для практичних розрахунків.

У даний час для практичного вимірювання тиску найчастіше застосовують кілограм-силу на 1 см^2 (технічна атмосфера): $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ кГ/см}^2 = 1 \text{ ат}$.

Оскільки $1 \text{ кгс} = 9,8 \text{ Н}$, а $1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2$, тоді:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Рідинні прилади для вимірювання тиску показують його в мм рт. ст. і мм вод. ст.

Якщо тиск зміряний висотою стовпця рідини, то для переведення його в паскалі (Па) користуються формулою

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \text{ Па}, \quad (1.4)$$

де ρ – густина рідини, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; h – висота стовпа рідини, м.

Таблиця 1.1 – Співвідношення між одиницями тиску

Одиниці	Паскаль (Н/м ²)	Бар (10 ⁵ Н/м ²)	Технічна атмосфера (кГ/см ²)	Фізична атмосфера (атм)	Міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст.)	Міліметр водяного стовпа (мм вод. ст.)
1 Па (Н/м ²)	1	10 ⁻⁵	1,02 · 10 ⁻⁵	0,987 · 10 ⁻⁵	7,50 · 10 ⁻³	0,102
1 бар	10 ⁵	1	1,02	0,987	750	1,02 · 10 ⁻⁴
1 ат (кГ/см ²)	9,81 · 10 ⁴	0,981	1	0,968	736	10 ⁴
1 атм (фіз.)	1,01 · 10 ⁵	1,013	1,03	1	760	1,03 · 10 ⁴
1 мм рт. ст.	133	1,33 · 10 ⁻³	1,36 · 10 ⁻³	1,32 · 10 ⁻³	1	13,6
1 мм вод. ст. (кГ/м ²)	9,81	0,98 · 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	0,968 · 10 ⁻⁴	0,0736	1

Для вимірювання невеликого надлишкового тиску і розрідження (вакууму) газу застосовують U-подібні рідинні манометри, мікроманометри, в яких робочою рідиною можуть бути дистильована вода, ртуть або спирт.

Для вимірювання високого тиску застосовують поршневі, трубчасті (пружинні), мембранні та інші манометри. Для вимірювання різниці тиску або, як кажуть, перепаду тиску, застосовують диференціальні манометри. Вимірювання дуже високого тиску (понад 200 МПа) здійснюють манганіновими манометрами, де вимірюється ефект зміни електричного опору манганінового дроту від тиску.

Для вимірювання тиску, що швидко змінюється, можуть бути використані п'єзокварцові або тензOMETричні манометри.

Температура

Температура є мірою інтенсивності теплового руху молекул. Її вимірюють по термодинамічній температурній шкалі або по міжнародній практичній шкалі. Перша шкала, за якою температура відраховується від стану повного спокою молекул називається шкалою Кельвіна (абсолютна шкала). Виміряна за

цією шкалою температура називається абсолютною T і одиницею температури є 1 Кельвін (К), а температура потрійної точки води дорівнює 273,16 К.

Друга шкала, за якою температура відраховується від температури танення льоду при тискові 760 мм рт. ст – 0 °С, а за 100 °С прийнята температура кипіння води при вказаному тиску називається шкалою Цельсія. Виміряна за цією шкалою температура позначається t , а одиницею температури є 1 градус (°С). Через те, що температура потрійної точки води відповідає 0,01°С, зв'язок між температурами вимірними за шкалою Кельвіна і шкалою Цельсія визначається виразом

$$T = t + 273,15 \approx t + 273, \text{ К.} \quad (1.5)$$

Для вимірювання температури застосовують рідинні термометри, термопари, пірометри та інші прилади. Їхня дія заснована на використанні таких властивостей речовин як теплове розширення, термоелектрорушійна сила, електричний опір, інтенсивність випромінювання та інших.

Калоричні параметри: **внутрішня енергія**

У термодинаміці розглядають внутрішню енергію U як суму внутрішньої кінетичної і внутрішньої потенціальної енергії атомів і молекул, що складають робоче тіло.

Внутрішня кінетична енергія у свою чергу складається з кінетичної енергії поступального руху молекул, кінетичної енергії обертального руху молекул, енергії коливального руху атомів. Кінетична енергія руху молекул – однозначна функція температури T . Потенціальна енергія сил взаємодії залежить від відстані між молекулами, тобто від об'єму V газу. Оскільки T і v є параметрами стану, то внутрішня енергія також є функцією стану робочого тіла. Для будь яких двох параметрів, визначають цей стан, можна написати $U = f_1(p, v)$; $U = f_2(p, T)$; $U = f_3(v, T)$.

Внутрішня енергія одиниці маси речовини називають питомою внутрішньою енергією $u = \frac{U}{M}$, Дж/кг. У техніці важливе не абсолютне значення внутрішньої енергії, а її зміна в термодинамічних процесах. Зміну внутрішньої енергії системи стану 1 до стану 2 можна записати

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Внутрішня енергія реального газу залежить від температури й об'єму тіла. Для ідеального газу внутрішня енергія визначається тільки значенням температури

$$u = c_v \cdot T, \quad (1.6)$$

де c_v – масова ізохорна теплоємність.

Зміна внутрішньої енергії ідеальних газів залежить лише від початкової температури T_1 і кінцевої температури T_2 процесу.

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1). \quad (1.7)$$

Внутрішню енергію при $t = 0^{\circ}\text{C}$ приймають рівною нулеві.

Ентальпія

У термодинамічних і теплотехнічних розрахунках часто використовують суму внутрішньої енергії системи U і добутку тиску p на величину об'єму системи, яку називають ентальпією

$$H = U + p \cdot V, \text{ Дж} \quad (1.8)$$

Для 1 кг робочого тіла, питома ентальпія h , Дж/кг, дорівнює

$$h = u + p \cdot v \quad (1.9)$$

Величини, що входять у (1.9) – параметри стану, і тому ентальпія також параметр стану, тобто зміна ентальпії в процесі не залежить від його характеру, а визначається тільки початковим і кінцевим станом робочого тіла.

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad (1.10)$$

Для ідеальних газів ентальпія залежить тільки від температури T і визначається

$$h = c_p \cdot T, \quad (1.11)$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, (кДж/(кг·К)).

Зміна ентальпії ідеального газу залежить від кінцевої T_2 і початкової T_1 температури процесу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (1.12)$$

При $t = 0^{\circ}\text{C}$ значення ентальпії приймають рівним нулеві.

Ентропія

Для довільної кількості робочого тіла ентропія позначається через S ; вимірюється в Дж/К, питома ентропія визначається $s = \frac{S}{M}$ і вимірюється в Дж/(кг·К).

Аналітично ентропія визначається

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1.13)$$

Зміна ентропії у термодинамічному процесі для станів 1,2 визначається

$$\Delta s = s_1 - s_2 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (1.14)$$

З рівняння (1.14) випливає, що зміна параметра s не залежить від характеру процесу, а визначається винятково початковими і кінцевими значеннями параметрів стану T і v , тому ентропія є також параметром стану робочого тіла.

При $t = 0^{\circ}\text{C}$ значення ентропії приймають рівним нулеві.

Рівняння стану ідеального газу

Термічні параметри залежать один від другого і взаємно пов'язані математичним рівнянням, яке називають термічним рівнянням або характеристичним рівнянням стану ідеального газу [1].

Вперше це рівняння було виведено французьким фізиком Клапейроном, тому названо його прізвищем.

Термічне рівняння стану для довільної кількості газу записують так

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot T \quad (1.15)$$

Для 1 кг газу

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

Якщо в рівнянні (1.15) замінити M на μ , а V на V_μ , то одержимо рівняння Клапейрона-Менделєєва для 1 кмоль газу

$$p \cdot V_\mu = R_\mu \cdot T, \quad (1.17)$$

де $V_\mu = \mu \cdot v$ – молярний об'єм робочого тіла, м³/кмоль (при нормальних фізичних умовах $V_\mu = 22,4$ м³/кмоль); μ – молярна маса газу (кг/кмоль);

$R_\mu = \mu \cdot R = 8314$ Дж/(кмоль·К) – універсальна газова стала.

Газова стала 1 кг довільного ідеального газу молярною масою μ дорівнює

$$R = \frac{8314}{\mu}. \quad (1.18)$$

1.2. Методичні рекомендації до розв'язування задач

Після вивчення цієї теми необхідно знати, що таке робоче тіло і які основні параметри визначають його стан. Слід добре запам'ятати одиниці виміру параметрів в системі СІ і зв'язок її з іншими системами одиниць, засвоїти відмінність ідеальних газів від реальних, запам'ятати рівняння стану для 1 кг, M кг та 1 кмоль газу. Вихідні дані для самостійного розв'язування задач наведені в табл. 1.2.

1.3. Питання для самоконтролю

1.3.1. Що вивчає термодинаміка?

1.3.2. Яким чином можна визначити поняття робочого тіла?

1.3.3. Чи можна вважати об'єм параметром стану?

1.3.4. Що таке абсолютний тиск?

1.3.5. Що являє собою абсолютна температура?

1.3.6. Як ви розумієте поняття вакуумного тиску?

1.3.7. Чи можна в рівняння стану ідеального газу підставляти значення тиску, виміряне в атмосферах чи барах?

1.3.8. Яким чином можна знайти значення універсальної газової сталої?

1.3.9. Чим відрізняється універсальна газова стала від газової сталої?

1.3.10. Чи можна використовувати рівняння стану ідеального газу до стану водяної пари?

1.3.11. Як ви розумієте поняття термодинамічної температурної шкали?

1.3.12. Якими приладами вимірюють температуру?

1.3.13. Якими приладами вимірюють надлишковий і вакуумний тиск?

1.3.14. Як можна виразити бар через інші одиниці виміру (Па, мм рт. ст., атм)?

1.3.15. Чи можна вважати масу газу параметром стану?

1.3.16. Назвіть кількісні одиниці виміру газу.

1.4. Приклади розв'язування задач

При виміру тиску високого стовпчика рідини для точних розрахунків необхідно враховувати зміну її густини у залежності від температури. При відхиленні температури рідини в приладі від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно вводити поправку на показання приладу. Простіше всього це зробити, якщо привести висоту ртутного стовпчика до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, способом введення поправки на температуру ртуті в приладі. Для визначення приведенного показника ртутного барометра користуються таким виразом [1]

$$V_0 = V(1 - 0,000172t), \quad (1.19)$$

де V_0 – показ барометра, що приведено до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; V – дійсна висота ртутного стовпчика при температурі $t\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0,000172$ – коефіцієнт об'ємного розширення ртуті. (Примітка. Якщо в задачах не вказана температура ртуті, барометричний тиск рахувати вже приведеним до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

1.4.1. Визначити абсолютний тиск газу в посуді в кПа (рис. 1.2). Якщо показ приєднаного до нього ртутного манометра дорівнює $h = 800$ мм рт. ст., а атмосферний тиск по ртутному барометру V складає 760 мм рт. ст. при температурі $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання

Атмосферний тиск, приведений до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює

$$V_0 = V(1 - 0,000172t) = 760 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 25) = 756,7 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютний тиск газу в посуді визначається за формулою

$$p = h + V_0 = 800 + 756,7 = 1556,7 \text{ мм рт. ст.} = 1556,7 \cdot 133 = 2,07 \cdot 10^5 \text{ Па} = 207 \text{ Па.}$$

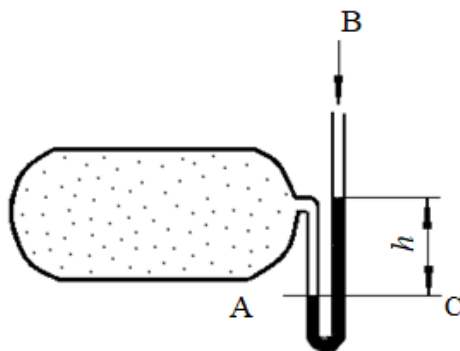


Рисунок 1.2 – До прикладу 1.4.1

1.4.2. Тиск повітря по ртутному барометру дорівнює 765 мм. Виразити приведений барометричний тиск в наступних одиницях: Па, ат, атм, мм рт. ст., бар.

Розв'язання

Для розв'язання задачі користуються даними табл. 1.1.

$$765 \text{ мм рт. ст.} = 765 \cdot 133 = 101745 \text{ Па} = 101,74 \text{ кПа} = \frac{765}{736} = 1,039 \text{ ат} = \frac{765}{760} =$$

$$1,006 \text{ атм} = 765 \cdot 13,6 = 10404 \text{ мм вод. ст.} = 10,4 \text{ м. вод. ст.} = \frac{765}{750} = 1,02 \text{ бар.}$$

Примітка. При виконанні індивідуальних завдань для розрахунків термодинамічних процесів і циклів енергетичних установок з достатньою точністю можна прийняти $1 \text{ ат} \approx 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

1.4.3. В процесі стиску у компресорі тиск повітря в певні моменти складав: $p_1 = 500 \text{ кПа}$, $p_2 = 70000 \text{ кг/м}^2$, $p_3 = 9 \text{ кг/см}^2$. Виразити найбільший з зазначених тисків в мегапаскалях (МПа), а найменший – в мм рт. ст. Обчислити середньоарифметичне трьох значень тиску і виразити його у фізичних атмосфера і барах.

Розв'язання

Для визначення найбільшого тиску у компресорі зведемо показники до однакової одиниці виміру (Па)

$$p_1 = 500 \text{ кПа} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad p_2 = 70000 \text{ кг/м}^2 = 7 \text{ кг/см}^2 (7 \text{ ат}) = 7 \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 6,87 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

Найбільше значення тиску p_3 в мегапаскалях (МПа) буде

$$p_3 = 8,83 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6} = 0,883 \text{ МПа.}$$

Найменше значення тиску p_1 в мм рт. ст.

$$p_1 = 5 \cdot 10^5 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 3750 \text{ мм рт. ст.}$$

Середньоарифметичне значення тиску у компресорі

$$p_{\text{ср}} = \frac{p_1 + p_2 + p_3}{3} = \frac{5 \cdot 10^5 + 6,87 \cdot 10^5 + 8,83 \cdot 10^5}{3} = 6,9 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

В фізичних атмосфера (атм)

$$p_{\text{ср}} = \frac{6,9 \cdot 10^5}{1,01 \cdot 10^5} = 6,83 \text{ атм.}$$

В барах (бар)

$$p_{\text{ср}} = \frac{6,9 \cdot 10^5}{10^5} = 6,9 \text{ бар.}$$

1.4.4. В трубці манометра 1 (рис. 1.3), який з'єднується з навколишнім середовищем, над ртуттю ще знаходиться стовп води висотою $h_b = 200 \text{ мм}$. Визначити абсолютний тиск у ресивері 2 і виразити його в кілопаскалях (кПа), якщо різниця рівнів ртуті у манометрі складає $h_p = 150 \text{ мм}$, а барометричний тиск $B = 0,95 \text{ атм}$.

Розв'язання

Надлишковий тиск в манометрі

$$p_H = h_p + h_b = 150 \cdot 133 + 200 \cdot 9,81 = 19950 + 1962 = 21911 \text{ Па} = 21,91 \text{ кПа.}$$

Абсолютний тиск розраховується по формулі (1.3)

$$p = p_H + B = 21911 + 0,95 \cdot 1,01 \cdot 10^5 = 21911 + 95950 = 117861 \text{ Па} = 117,86 \text{ кПа}$$

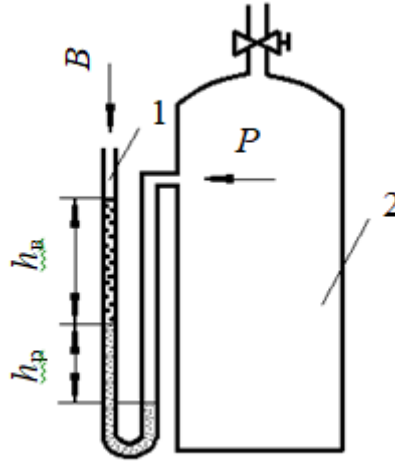


Рисунок 1.3 – До прикладу 1.4.4

1.4.5. Абсолютний тиск пари на вході в турбіну 2 (рис. 1.4) атомної електростанції (АЕС) по паспортним даним $p_T = 6,65$ МПа. Тиск пари на виході з реактора 1 виміряно манометром, градуїрованим в технічних атмосферах, дорівнює $p_H = 68,5$ ат при показанні барометра у приміщенні АЕС $B = 745$ мм рт. ст. Обчислити втрату тиску Δp (МПа) в трубопроводі 3, а також значення розрідження p_B в конденсаторі парової турбіни 4, якщо тиск в ньому по паспортним даним $p_K = 4$ кПа.

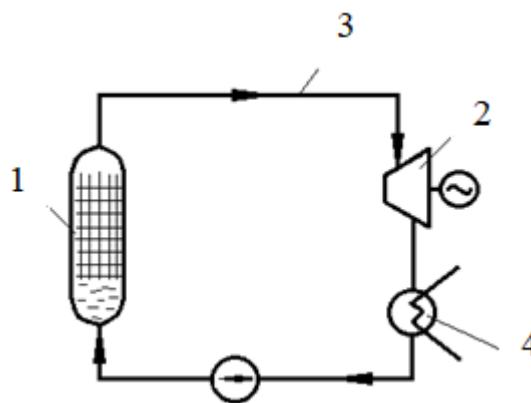


Рисунок 1.4 – До прикладу 1.4.5

Розв'язання

Абсолютний тиск пари на виході з реактора

$$p = p_H + B = 68,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4 + 745 \cdot 133 = 6811070 \text{ Па} = 6,81 \text{ МПа.}$$

Втрата тиску в трубопроводі 3

$$\Delta p = p - p_t = 6,81 - 6,65 = 0,16 \text{ МПа.}$$

Розрідження в конденсаторі визначається за формулою (1.3)

$$p_B = B - p_K = \frac{745 \cdot 133}{10^3} - 4 = 95,08 \text{ кПа.}$$

1.4.6. Для точного виміру надлишкового тиску або перевірки зразка пружинних манометрів застосовуються вантажопоршневі манометри системи Індрика. Будова такого манометра показано на рис. 1.5.

У вимірювальній колонці 1 є канал, в якому ходить поршень 2 малого діаметру. З поршнем з'єднується вантажоприйомна тарілка 3, на яку накладаються вантажі, точна вага яких відома. Внутрішні запони манометра заповнюються касторовим маслом крізь штуцер 7. Штуцер 4 служить для з'єднання з середовищем, тиск якого вимірюється. Штуцер 5 призначається для приєднання манометрів, що перевіряються. Тиск по внутрішнім запонам манометра можна створювати за допомогою преса 6.

Визначити абсолютний тиск в середовищі, яке досліджується, якщо в становищі рівноваги на тарілці 3 установлені п'ять вантажів вагою по 10 кг, три вантажі по 3 кг і два по 550 г. Барометр показує тиск $B = 748 \text{ мм рт. ст.}$, площа поршня 2 – $F = 0,5 \text{ см}^2$.

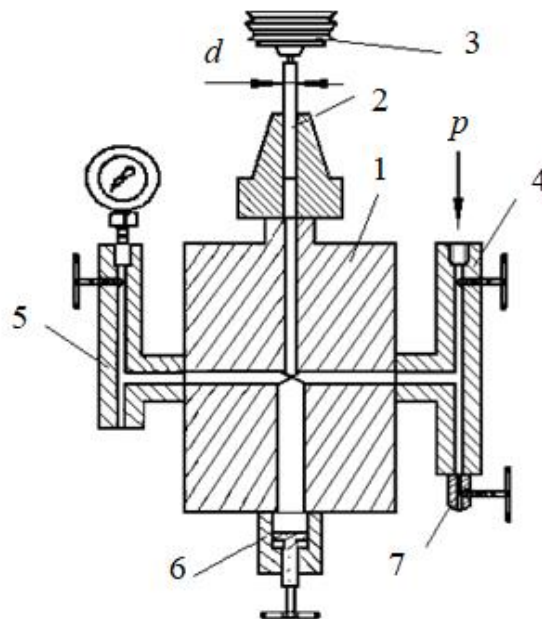


Рисунок 1.5 – До прикладу 1.4.6

Розв'язання

Надлишковий тиск, що показує вантажопоршневий манометр

$$p_H = \frac{5 \cdot 10 + 3 \cdot 3 + 2 \cdot 0,55}{0,5} = \frac{60,1}{0,5} = 120,2 \text{ кг/см}^2.$$

Абсолютний тиск визначається по формулі (1.3)

$$p = p_n + B = \frac{120,2 \cdot 0,981 \cdot 10^5}{10^6} + \frac{748 \cdot 133}{10^6} = 11,89 \text{ МПа.}$$

1.4.7. Для виміру витрати рідини й газів використовують дросельну діафрагму 1. Схема виміру показана на рис. 1.6

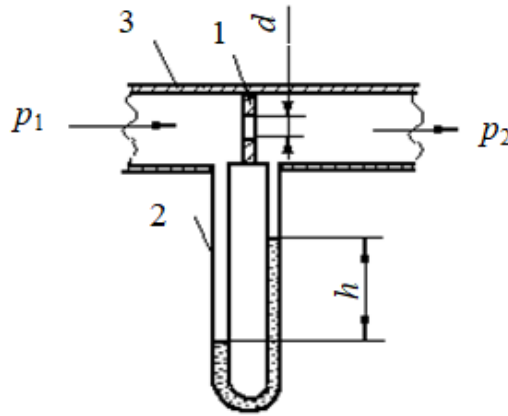


Рисунок 1.6 – До прикладу 1.4.7

Поточний газ проходить по трубі 3 крізь дросельну діафрагму 1. В результаті дроселювання тиск p_2 за діафрагмою буде меншим, ніж тиск p_1 перед нею. Перепад тиску на діафрагмі вимірюється диференціальним U-образним манометром 2. Витрата газу обчислюється за формулою

$$V = K \cdot d^2 \cdot \frac{\sqrt{p_1 \cdot h}}{p_0} \cdot T_0, \quad (1.20)$$

де V – шукана об’ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{с}$; $K = 58,94$ – сталий коефіцієнт; d – діаметр вхідного отвору діафрагми, м; T_d – абсолютна температура повітря перед діафрагмою, К; p_0 – тиск атмосферного повітря, Па; T_0 – абсолютна температура атмосферного повітря, К; h – різниця рівнів рідини в колінах дифманометра, мм; p_1 – абсолютний тиск повітря перед діафрагмою, Па.

Визначити перепад тиску на діафрагмі Δp в кПа, а також годинну витрату стиснутого повітря, якщо показання дифманометра $h = 260$ мм вод. ст., діаметр отвору діафрагми $d = 0,04$ м, надлишковий тиск повітря перед діафрагмою $p_n = 4,5$ ат, температура повітря перед діафрагмою $t_d = 27$ °С, температура атмосферного тиску $t_0 = 17$ °С, а атмосферний тиск складає $p_0 = 740$ мм рт. ст.

Розв’язання

Перепад тиску на діафрагмі Δp в кілопаскалях становить:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = h = 260 \cdot 9,81 = 2550,6 = 2,55 \text{ кПа.}$$

Визначимо задані параметри повітря в одиницях виміру, які зазначені у формулі (1.20).

Абсолютна температура повітря перед діафрагмою

$$T_d = t_d + 273 = 27 + 273 = 300 \text{ К.}$$

Абсолютна тиск стислого повітря перед діафрагмою

$$p = p_n + p_0 = 4,5 \cdot 0,98 \cdot 10^5 + 740 \cdot 133 = 5,394 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Витрати стиснутого повітря за формулою (1.20)

$$V = 58,94 \cdot 0,04^2 \cdot \sqrt{\frac{5,394 \cdot 10^5 \cdot 260}{300}} \cdot 290 = 0,19 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Годинна витрата стиснутого повітря

$$V = 0,19 \cdot 3600 = 684 \text{ м}^3/\text{год.}$$

1.4.8. Для виміру невеликих надлишкових тисків або невеликих розріджень (наприклад, при випробуванні дуттєвого вентилятора) використовуються мікроманометри. Принципова схема такої установки наведена на рис. 1.7.

Установка складається з вентилятора 1 з приводом від електродвигуна 2. На всмоктуючій стороні установки встановлені витратомір 3 та дросельна заслонка 4. На нагнітальній стороні – повітропровід 5. Для виміру розрідження зі всмоктуючій сторони та надлишкового тиску повітря з нагнітальної сторони при випробуванні вентиляторів використовуються мікроманометри 6, 7.

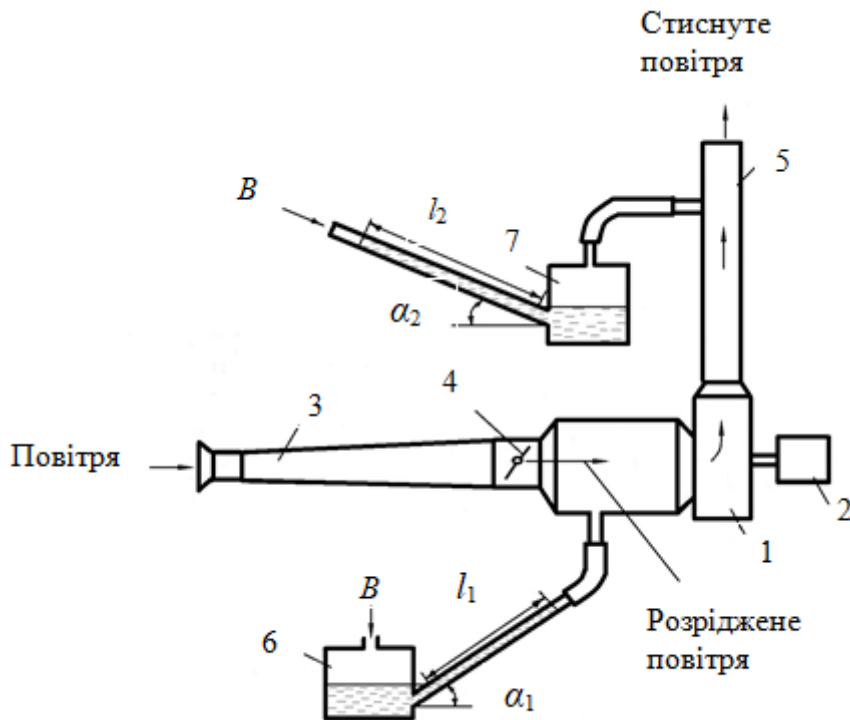


Рисунок 1.7 – До прикладу 1.4.8

Визначити абсолютний тиск повітря на вході і виході з вентилятора лабораторної установки в кілопаскалях (кПа), якщо довжина стовпа рідини в

трубці мікроманометра 6 нахиленого під кутом $\alpha_1 = 35^\circ$, $l_1 = 150$ мм довжина стовпа в трубці мікроманометра 7, нахиленого під кутом $\alpha_2 = 30^\circ$, $l_2 = 250$ мм. Робоча рідина – спирт, густина якого $\rho = 800$ кг/м³. Барометричний тиск середовища де знаходиться лабораторна установка дорівнює $B = 1,035$ ат.

Розв'язання

При використанні мікроманометрів зі змінним кутом нахилу вимірювальної трубки абсолютний тиск визначається за формулою

$$p = l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha + B. \quad (1.21)$$

Виразимо атмосферний тиск в Па

$$B = 1,035 \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 1,015 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Абсолютний тиск повітря на вході в вентилятор

$$p = B - l_1 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha_1 = 1,015 \cdot 10^5 - 0,15 \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot \sin 35 = 1,006 \cdot 10^5 \text{ Па} = \\ = 100,6 \text{ кПа.}$$

Абсолютний тиск повітря на виході з вентилятора

$$p = l_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha_2 + B = 0,25 \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot \sin 30 + 1,015 \cdot 10^5 = 1,0248 \cdot 10^5 \text{ Па} = \\ = 102,48 \text{ кПа.}$$

1.4.9. Визначити масу азоту N_2 ($\mu = 28$ кг/кмоль) в сосуді об'ємом $V = 120 \text{ м}^3$ при температурі $t = 35^\circ \text{C}$. Тиск газу по манометру $p_n = 0,4$ МПа. Барометричний тиск $B = 755$ мм рт. ст.

Розв'язання

Використовуємо термічне рівняння стану для довільної кількості газу $p \cdot V = M \cdot R \cdot T$.

$$\text{Звідки } M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T},$$

$$\text{де } p = p_n + B = 0,4 \cdot 10^6 + 755 \cdot 133 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па; } T = 273 + t = 273 + 35 = 308 \text{ К.}$$

$$\text{Газова стала для азоту } R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

$$M = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 120}{297 \cdot 308} = 656 \text{ кг.}$$

1.4.10. Визначити масу кисню O_2 ($\mu = 32$ кг/кмоль), який знаходиться в балоні місткістю 90 л, якщо тиск кисню за манометром дорівнює 3,08 МПа, а покази ртутного барометра $B = 99325$ Па при температурі $t = 25^\circ \text{C}$.

Розв'язання

З характеристичного рівняння для маси M кг маємо $M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}$.

Об'єм балона $V = 90 \text{ л} = 0,09 \text{ м}^3$.

Атмосферний тиск зведемо до 0°C

$$B_0 = B(1 - 0,000172t),$$

$$B_0 = 99325 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 25) = 98898 \text{ Па.}$$

Абсолютний тиск у балоні

$$p = p_n + B_0 = 3080000 + 98898 = 3178898 \text{ Па.}$$

Абсолютна температура

$$T = t + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ К.}$$

Питома газова стала для кисню

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{32} = 259,8 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К).}$$

Виконавши обчислення, знайдемо

$$M = \frac{3178898 \cdot 0,09}{259,8 \cdot 298} = 3,69 \text{ кг.}$$

1.4.11. Знайти густину і питомий об'єм двоокису вуглецю CO_2 ($\mu = 44$ кг/кмоль) при нормальних умовах.

Розв'язання

Густину газу при нормальних умовах знайдемо за формулою

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} = \frac{44}{22,4} = 1,965 \text{ кг/м}^3, \quad v_n = \frac{1}{\rho_n} = \frac{1}{1,965} = 0,51 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

1.4.12. Густина повітря при нормальних умовах $\rho_n = 1,293$ кг/м³. Якою буде густина повітря при тиску $p = 1,5$ МПа і температура $t = 20$ °С?

Розв'язання

Запишемо характеристичне рівняння для 1 кг повітря для двох станів: при нормальних умовах і для заданого стану: $p_n \cdot v_n = R \cdot T_n$ та $p \cdot v = R \cdot T$.

$$\text{Звідки } R = \frac{p_n \cdot v_n}{T_n} \text{ та } R = \frac{p \cdot v}{T} \text{ і, отже,}$$

$$\frac{p_n \cdot v_n}{T_n} = \frac{p \cdot v}{T} \text{ або } \frac{p_n}{\rho_n \cdot T_n} = \frac{p}{\rho \cdot T}.$$

З останнього рівняння знаходимо

$$\rho = \frac{\rho_n \cdot T_n \cdot p}{p_n \cdot T},$$

$$\text{де } T_n = 273 \text{ К, } p_n = 101325 \text{ Па.}$$

Обчислимо

$$\rho = \frac{1,293 \cdot 273 \cdot 15 \cdot 10^5}{101325 \cdot 293} = 17,83 \text{ кг/м}^3.$$

1.4.13. В циліндрі поршневого компресора знаходиться повітря об'ємом $0,8$ м³ при тиску $0,5$ МПа. Як зміниться об'єм повітря при підвищенні тиску до $0,8$ МПа, якщо температура повітря не зміниться?

Розв'язання

При постійній температурі об'єм газу змінюється за законом Бойля-Маріотта

$$p \cdot v = \text{const} \text{ або } p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2, \text{ звідси } V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2}.$$

Виконавши обчислення, одержимо:

$$V_2 = \frac{0,5 \cdot 0,8}{0,8} = 0,5 \text{ м}^3.$$

1.4.14. У скільки разів об'єм певної маси газу при -20°C менший, ніж при $+20^\circ\text{C}$, якщо тиск в обох випадках однаковий?

Розв'язання

При постійному тиску об'єм газу змінюється згідно закону Гей-Люссака

$$\frac{p}{v} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Звідки після обчислення знаходимо

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{273 + 20}{273 - 20} = 1,16.$$

1.4.15. В посудині знаходиться розріджене повітря ($\mu = 29$ кг/кмоль) при $p_B = 20$ кПа і температурі 0°C . Ртутний барометр показує тиск $B = 99835$ Па. Визначити питомий об'єм і густину повітря за цих умов.

Розв'язання

Абсолютний тиск повітря в посудині

$$p = B - p_B = 99835 - 20 \cdot 10^3 = 79835 \text{ Па}.$$

Із характеристичного рівняння для 1 кг повітря маємо

$$v = \frac{R \cdot T}{p}.$$

Питома газова стала для повітря $R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286,7$ Дж/(кг·К).

Обчисливши, знайдемо питомий об'єм і густину повітря

$$v = \frac{286,7 \cdot 273}{79835} = 0,98 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,98} = 1,02 \text{ кг/м}^3.$$

1.4.16. За час подачі компресором стиснутого повітря в резервуар надлишковий тиск в ньому підвищується від нуля до $p_H = 3000$ мм рт. ст., а температура від $t_1 = 17^\circ\text{C}$ до $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Резервуар місткістю $V = 54$ м³. Визначити масу повітря, яке подано компресором у резервуар, якщо атмосферний тиск $B = 750$ мм рт. ст.

Розв'язання

З термічного рівняння (1.15) маса повітря в резервуарі до подачі його компресором

$$M_1 = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1}, \text{ а після подачі } M_2 = \frac{p_2 \cdot V}{R \cdot T_2}.$$

Отже, маса повітря, поданого компресором в резервуар,

$$\Delta M = M_2 - M_1 = \frac{V}{R} \left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right),$$

$$\text{де } p_1 = B + 0 = 750 \text{ мм рт. ст.} = 99750 \text{ Па};$$

$$p_2 = B + p_{\text{н}} = 750 + 3000 = 3750 \text{ мм рт. ст.} = 498750 \text{ Па};$$

$$T_1 = t_1 + 273 = 17 + 273 = 290 \text{ К};$$

$$T_2 = t_2 + 273 = 27 + 273 = 300 \text{ К};$$

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Після обчислення знаходимо значення ΔM

$$\Delta M = \frac{54}{286,7} \left(\frac{498750}{300} - \frac{99750}{290} \right) = 248,3 \text{ кг}.$$

1.4.17. Об'ємна витрата повітря в нагнітальному трубопроводі компресора при кінцевих температурі $t = 110^\circ\text{C}$ і тиску $p = 0,9 \text{ МПа}$ дорівнює $V_{\text{к}} = 4 \text{ м}^3/\text{с}$. Визначити масову витрату повітря $M_{\text{к}}$.

Розв'язання

Для визначення масової витрати повітря можна користуватись рівнянням стану ідеального газу у такому вигляді

$$p \cdot V_{\text{к}} = M_{\text{к}} \cdot R \cdot T, \text{ звідки } M_{\text{к}} = \frac{p \cdot V_{\text{к}}}{R \cdot T},$$

$$\text{де } R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); T = t + 273 = 110 + 273 = 383 \text{ К}.$$

$$\text{Масова витрата } M_{\text{к}} = \frac{0,9 \cdot 10^6 \cdot 4}{286,7 \cdot 383} = 32,9 \text{ кг/с}.$$

1.4.18. Поршневий компресор, подача якого при температурі всмоктувального повітря $t_1 = 17^\circ\text{C}$ і атмосферного тиску $p_1 = 100 \text{ кПа}$, дорівнює $V_{\text{к}} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, нагнітає повітря в резервуар об'ємом 21 м^3 .

За скільки хвилин компресор підніме тиск в резервуарі до $p_3 = 0,9 \text{ МПа}$, якщо температура в нагнітальному трубопроводі $t_3 = 50^\circ\text{C}$? Початковий тиск в резервуарі становить $p_2 = 200 \text{ кПа}$ при температурі $t_2 = 20^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Знайдемо спочатку масову подачу компресора

$$M_{\text{к}} = \frac{p_1 \cdot V_{\text{к}}}{R \cdot T_1} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 10}{286,7 \cdot 290} = 12,03 \text{ кг/хв},$$

$$\text{де } R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); T_1 = t_1 + 273 = 17 + 273 = 290 \text{ К}.$$

З термічного рівняння для ідеального газу (1.15) знайдемо масу повітря в резервуарі до нагнітання і після нагнітання

$$\text{до нагнітання } M_1 = \frac{p_2 \cdot V}{R \cdot T_2} = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 21}{286,7 \cdot (20 + 273)} = 50 \text{ кг,}$$

$$\text{після нагнітання } M_2 = \frac{p_3 \cdot V}{R \cdot T_3} = \frac{0,9 \cdot 10^6 \cdot 21}{286,7 \cdot (50 + 273)} = 204 \text{ кг.}$$

Маса повітря поданого компресором у резервуар

$$\Delta M = M_2 - M_1 = 204 - 50 = 154 \text{ кг.}$$

Час підняття тиску в резервуарі до 0,9 МПа.

$$\tau = \frac{\Delta M}{M_k} = \frac{154}{12,03} = 12,8 \text{ хв.}$$

1.4.19. Дуттєвий вентилятор подає в топку парового котла $V_B = 102000 \text{ м}^3/\text{Год}$ повітря при температурі $300 \text{ }^\circ\text{C}$ й надлишковим тиском $p_{\text{надл}} = 155 \text{ мм вод. ст.}$ Барометричний тиск повітря в приміщенні $B = 100,7 \text{ кПа}$. Визначити погодинну продуктивність вентилятора в м^3 при нормальних умовах ($p_H, V_{B,H}, T_H$).

Розв'язання

Погодинну продуктивність дуттєвого вентилятора при нормальних умовах знайдемо із співвідношення $\frac{p \cdot V_B}{T} = \frac{p_H \cdot V_{B,H}}{T_H}$, одержаного з термічного

рівняння (1.15) записаним для двох різних станів повітря

Маємо

$$V_{B,H} = \frac{p \cdot V_B \cdot T_H}{T \cdot p_H} = \frac{102220 \cdot 102000 \cdot 273}{573 \cdot 101325} = 49026 \text{ м}^3/\text{Год,}$$

$$\text{де } p = p_{\text{надл}} + B = 1520 + 100700 = 102220 \text{ Па;}$$

$$p_{\text{надл}} = 155 \cdot 9,81 = 1520 \text{ Па – напір вентилятора;}$$

$$T_H = 273 \text{ К, } T = t + 273 = 300 + 273 = 573 \text{ К.}$$

1.4.20. Об'ємна витрата стиснутого повітря в нагнітальному трубопроводі одноступінчастого поршневого компресора при температурі повітря $T_1 = 420 \text{ К}$ і тиску $p_1 = 0,35 \text{ МПа}$ дорівнює $V_K = 0,55 \text{ м}^3/\text{с}$. Визначити продуктивність компресора для умов всмоктування V_{K_0} , якщо атмосферний тиск повітря $p_0 = 0,95 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а температура $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Запишемо термічне рівняння (1.15) для двох зазначених станів повітря

$$p_0 \cdot V_{K_0} = M \cdot R \cdot T_0 \quad \text{та} \quad p_1 \cdot V_K = M \cdot R \cdot T_1.$$

Звідки

$$\frac{p_0 \cdot V_{к_0}}{T_0} = M \cdot R \quad \text{та} \quad \frac{p_1 \cdot V_{к_1}}{T_1} = M \cdot R \quad \text{і, отже,} \quad \frac{p_0 \cdot V_{к_0}}{T_0} = \frac{p_1 \cdot V_{к_1}}{T_1}.$$

З останнього рівняння знаходимо

$$V_{к_0} = \frac{p_1 \cdot V_{к_1} \cdot T_0}{p_0 \cdot T_1} = \frac{0,35 \cdot 10^6 \cdot 0,55 \cdot (273 + 25)}{0,095 \cdot 10^6 \cdot 420} = 1,44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

1.5. Задачі

1.5.1. Визначити абсолютний тиск у паровому котлі, якщо манометр показує надлишковий тиск пари $P_{н}$, атмосферний тиск за ртутним барометром становить B при температурі t_1 .

1.5.2. У посудині об'ємом V міститься M кілограмів окису вуглецю. Визначити питомий об'єм і густину окису вуглецю в зазначених умовах.

1.5.3. У процесі стискування повітря в компресорі його тиск у деякі моменти становив p_1 (кгс/см²), p_2 (кгс/см²) і p_3 (кгс/см²). Виразити найбільше значення із перелічених величин у МПа, а найменше – у мм рт. ст. Обчислити середнє арифметичне трьох значень тиску і виразити його у фізичних атмосферах, барах і метрах водяного стовпа.

1.5.4. Визначити абсолютний тиск ракети на днище контейнера. Ракету встановлено на підводному човні, який перебуває на глибині 19 м, при цьому значення барометричного тиску відповідає величині B .

1.5.5. За даними випробувань парової турбіни розрідження в її конденсаторі становить $p_{\text{вак}}$ при барометричному тиску B . Яке значення має величина тиску в конденсаторі ?

1.5.6. Для вимірювання розрідження до димоходу парового котла приєднали тягомір (рис. 1.8), кут нахилу трубки якого $\alpha = 30^\circ$. Довжина стовпа води відлічена за шкалою h . Визначити величину абсолютного тиску газів, якщо покази ртутного барометра дорівнюють величині B при температурі стовпа ртуті t_1 .

1.5.7. Для вимірювання рідини в посудині іноді використовується обладнання, схема якого зображена на рис. 1.9. Визначити рівень бензину в баку, якщо перепад тиску ртутного дифманометра дорівнює величині h , а густина бензину $\rho = 840 \text{ кг/м}^3$.

1.5.8. Визначити масу вуглекислого газу в посудині об'ємом V при температурі t_1 . Тиск газу на манометрі дорівнює $P_{н}$, а барометричний тиск B .

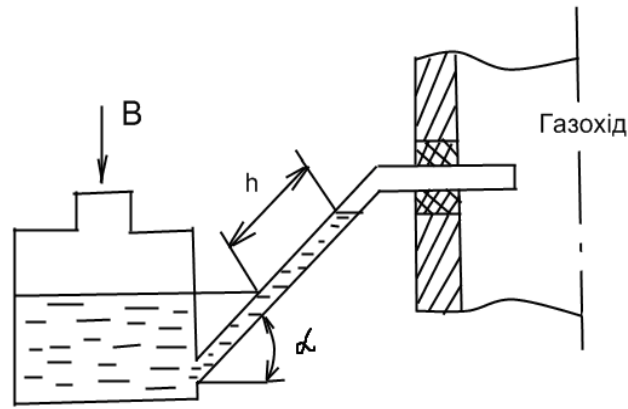


Рисунок 1.8 – Схема вимірювання розрідження у димоході парового котла за допомогою тягоміра

1.5.9. У циліндрі з рухомим поршнем повітря займає об'єм V при тиску p_1 (МПа). Як повинен змінитися об'єм повітря, щоб при підвищенні тиску до p_2 (МПа) його температура не змінилася ?

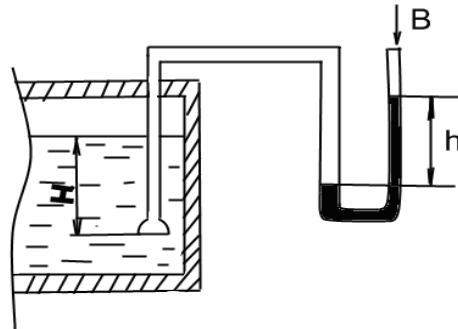


Рисунок 1.9 – Схема обладнання для виміру рівня рідини в судині

1.5.10. Визначити масу кисню, що міститься в балоні ємністю 60 л при температурі t_1 , якщо величина тиску кисню на манометрі дорівнює p_n , а показання ртутного барометра відповідає величині B .

1.5.11. Який об'єм будуть займати M кг повітря при тиску p_n і температурі t_1 ? Барометричний тиск навколишнього середовища відповідає величині B .

1.5.12. У балоні об'ємом V міститься кисень, тиск якого відповідає величині p_3 (МПа), а температура t_1 . Після того, як із балона було випущено частину газу, покази стали відповідати величині p_1 (МПа), а температура кисню знизилась до 10°C . Визначити масу випущеного кисню та густину залишку, якщо тиск навколишнього середовища відповідає величині B .

1.5.13. У резервуар об'ємом V компресор подає повітря при температурі t_1 і тиску B . За який час компресор, подача якого дорівнює $3 \text{ м}^3/\text{хв}$, наповнить резервуар до тиску p_2 (бар), якщо температура повітря в резервуарі при зазначеному тиску відповідає величині t_2 ? Перед накачуванням резервуар був сполучений з атмосферою.

1.5.14. Тиск у барокамері, що має розміри $2 \times 2 \times 1$ м, вимірюють манометром, його значення становить p_n , температура t_1 . Визначити масу

повітря, яке необхідно відкачати з барокамери, щоб створити в ній розрідження P_n , не змінюючи температури. Барометричний тиск дорівнює B .

1.5.15. Компресор подає стиснуте повітря в резервуар, причому за час роботи компресора тиск у резервуарі на манометрі підвищується від атмосферного до p_2 (кгс/см²), температура від t_1 до t_2 . Об'єм резервуара дорівнює V . Барометричний тиск – B . Визначити масу повітря, поданого компресором у резервуар.

1.5.16. Стиснутий кисень в балоні має температуру t_1 і тиск по манометру p_n . За час пожежі температура кисню в балоні піднялася до t_2 . Атмосферний тиск прийняти $B = 750$ мм рт. ст. Чи вибухне балон при цій температурі, якщо допустимий тиск в ньому дорівнює $p_d = 6,0$ МПа?

1.5.17. В посудині місткістю V знаходиться повітря при абсолютному тиску p_1 (МПа) і температурі t_1 .

Скільки повітря треба відкачати з посудини, щоб розрідження в ній становило $p_b = 56$ кПа при умові, що температура в посудині не зміниться? Атмосферний тиск за ртутним барометром дорівнює B при температурі ртуті в ньому $t_{рт.} = 20$ °С.

Таблиця 1.2

Остання цифра шифру	B , мм рт. ст.	p_1	p_2	p_3	p_n , МПа	M , кг	Передостання цифра шифру	$p_{\text{вак}}$, %	t_1 , °С	t_2 , °С	V , м ³	H , мм	h , мм
0	755	2,8	3,5	6,0	2,5	21	0	80	22	60	7,5	510	180
1	750	2,3	3,8	7,0	3,5	23	1	70	30	80	8,3	500	190
2	740	2,4	3,5	5,5	4,0	28	2	60	32	90	9,5	470	150
3	745	2,5	3,8	5,0	3,0	35	3	50	35	85	11,8	350	210
4	730	2,8	3,4	5,1	2,0	40	4	75	25	70	14,3	400	205
5	750	3,9	4,7	5,8	4,5	15	5	85	33	75	10,0	480	230
6	735	3,8	4,2	5,5	4,8	33	6	65	27	62	21,0	390	300
7	740	2,5	2,6	7,5	3,7	17	7	45	21	71	10,5	350	280
8	750	2,4	3,8	6,5	2,8	34	8	90	23	63	19,5	330	270
9	765	2,3	2,9	6,8	3,4	18	9	82	31	83	12,1	440	240

2. ГАЗОВІ СУМІШІ

Викладено короткі теоретичні відомості про способи визначення складу газової суміші, парціальні тиск та об'єм її компонентів; закон Дальтона; рівняння стану суміші; розрахунок газової сталої та уявної молекулярної маси суміші.

Мета – сформулювати знання про методичку описування властивостей суміші ідеальних газів та сутність величин, що її характеризують.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- визначати властивості газової суміші;
- користуватися основним законом і способами її завдання;
- визначити молекулярну масу суміші;
- визначити газову сталу суміші.

2.1. Короткі теоретичні відомості

В енергетичних установках в якості робочого тіла використовуються як чисті гази, так і газові суміші. Прикладами технічно важливих газових сумішей є атмосферне повітря, що складається з азоту, кисню, водяної пари і інших газів; продукти згоряння палива, що містять вуглекислий газ, азот, водяну пару та інші.

Технічна термодинаміка вивчає газові суміші, що являють собою механічну суміш різних газів, між якими не має хімічних реакцій, тобто складові суміші без зміну свого складу. Закони Бойля-Маріотта і Гей-Люссака справедливі для газових сумішей. Так само, як для простих газів, тому суміші ідеальних газів підлягають рівнянню ідеального газу

$$p_c \cdot V_c = M_c \cdot R_c \cdot T, \quad (2.1)$$

де p_c – повний тиск суміші; V_c – об'єм суміші; R_c – газова стала суміші; M_c – маса суміші.

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c}. \quad (2.2)$$

де μ_c – молярна маса суміші.

Рівняння стану для 1 кг суміші газів має вигляд

$$p_c \cdot v_c = R_c \cdot T, \text{ або } p_c = \rho_c \cdot R_c \cdot T, \quad (2.3)$$

де v_c , ρ_c – відповідно питомий об'єм і густина суміші газів; T – температура суміші газів, яка являється однаковою для всіх компонентів суміші.

Відповідно до закону Дальтона загальний тиск газових сумішей дорівнює сумі парціальних тисків газів, що входять в цю суміш, тобто

$$p_c = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{k=1}^n p_k, \quad (2.4)$$

де p_k – парціальний тиск k -го компонента суміші; n – кількість газів, що складають суміш.

Парціальним називається тиск компонента газової суміші, який він чинив би на стінки посудини, якби цей компонент займав той же об'єм, що і вся суміш, при тій же температурі.

Склад газової суміші найчастіше задається в масових (m) і об'ємних (r) частках, рідше – в мольних частках.

Масова частка k -го компонента суміші являє собою відношення маси цього компонента до маси всієї суміші, тобто

$$m_k = \frac{M_k}{M_c}. \quad (2.5)$$

Об'ємною часткою r_k деякого k -го компонента суміші називається відношення парціального об'єму цього компонента до об'єму всієї суміші, тобто

$$r_k = \frac{V_k}{V_c}. \quad (2.6)$$

Мають місце такі рівності

$$\sum_{k=1}^n m_k = 1,$$
$$\sum_{k=1}^n r_k = 1.$$

Формули для розрахунку газових сумішей наведені в табл. 2.1.

Молекулярну масу газової суміші називають середньою або уявною в дійсності для суміші поняття молекулярної маси умовне. Фактично мається на увазі молекулярна маса деякого однорідного газу тієї ж маси із тими ж термодинамічними властивостями, як і в суміші, яка розглядається [2].

Таблиця 2.1

Спосіб завдання суміші	Масовими частками m_k	Об'ємними частками, r_k	Питомий об'єм суміші, v_c	Густина суміші, ρ_c	Середня (уявна) молекулярна маса, μ_c	Газова стала суміші, R_c	Парціальний тиск компонента, p_k	Перерахунок з одного складу в інший
	$v_c = \sum_1^n \frac{m_k}{\rho_k}$	$v_c = \frac{1}{\sum_1^n r_k \cdot \rho_k}$	$\rho_c = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_k}{\rho_k}}$	$\mu_c = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_k}{\mu_k}}$	$R_c = \sum_1^n m_k \cdot R_k$	$p_k = m_k \cdot \frac{R_k}{R_c} \cdot p_c$	$r_k = \frac{m_k}{\mu_k} \cdot \frac{\mu_c}{\sum_1^n m_k}$	$m_k = \frac{r_k \cdot \mu_k}{\sum_1^n r_k \cdot \mu_k}$

2.2. Методичні рекомендації до розв'язування задач

Матеріал цієї теми має практичний інтерес, оскільки здебільшого реальні гази є сумішами. Необхідно знати властивості газової суміші, основний закон і способи її завдання. Вміти визначити молекулярну масу і газову сталу суміші. Вихідні дані для самостійного розв'язування задач наведені в табл. 2.2.

2.3. Питання для самоконтролю

2.3.1. Що являє собою газова суміш?

2.3.2. Дайте формулювання закону Дальтона.

2.3.3. Визначте поняття парціального тиску.

2.3.4. Сформулюйте поняття масової, об'ємної і мольної часток, наведіть їхні позначення?

2.3.5. Що називається парціальним або приведеним об'ємом?

2.3.6. Чи придатне рівняння стану ідеального газу для газової суміші?

2.3.7. Наведіть приклад газової суміші, задайте її одним із засобів.

2.3.8. Яким чином визначають тиск газової суміші?

2.4. Приклади розв'язування задач

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

Визначити об'ємний склад повітря, його газову сталу, уявлену молекулярну масу суміші і парціальний тиск кожного компонента при тиску повітря $B = 760$ мм рт. ст.

Розв'язання

Маса кіломоля кожного компонента

$$\mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль}; \mu_{N_2} = 28 \text{ кг/кмоль}.$$

Питомі газові сталі компонентів

$$R_{O_2} = \frac{8314}{32} = 260 \text{ Дж/(кг·К)}; R_{N_2} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Для визначення шуканих величин скористуємось формулами наведеними в табл. 2.1.

Газова стала повітря

$$R_c = m_{O_2} \cdot R_{O_2} + m_{N_2} \cdot R_{N_2} = 0,232 \cdot 260 + 0,768 \cdot 297 = 288,4 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Об'ємні частки компонентів

$$r_{O_2} = \frac{\frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{23,2}{32}}{\frac{23,2}{32} + \frac{76,8}{28}} = 0,209.$$

$$r_{N_2} = \frac{\frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}}}{\frac{m_{N_2}}{\mu_{N_2}} + \frac{m_{O_2}}{\mu_{O_2}}} = \frac{\frac{76,8}{28}}{\frac{76,8}{28} + \frac{23,2}{32}} = 0,791 .$$

Уявлена молекулярна маса

$$\mu_c = r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2} = 0,209 \cdot 32 + 0,791 \cdot 28 = 28,84 \text{ кг/кмоль.}$$

Парціальні тиски компонентів

$$p_{O_2} = r_{O_2} \cdot B = 0,209 \cdot 760 = 158,84 \text{ мм рт. ст.} = 158,84 \cdot 133 = 21125,7 \text{ Па.}$$

$$p_{N_2} = r_{N_2} \cdot B = 0,791 \cdot 760 = 601,16 \text{ мм рт. ст.} = 79954,3 \text{ Па.}$$

2.4.2. Об'ємні частки компонентів суміші ідеальних газів: 25 % CO₂ і 75 % O₂. Тиск суміші дорівнює $p_c = 0,085$ МПа, температура $t = 100^\circ\text{C}$. Знайти парціальні тиски компонентів, масові частки компонентів, молярну масу і газову сталу суміші, а також густину суміші при нормальних і заданих умовах.

Розв'язання

Парціальні тиски компонентів

$$p_{CO_2} = r_{CO_2} \cdot p_c = 0,25 \cdot 0,085 = 0,022 \text{ МПа;}$$

$$p_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_c = 0,75 \cdot 0,085 = 0,063 \text{ МПа.}$$

Масові частки компонентів

$$m_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}}{\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2}} = \frac{44 \cdot 0,25}{44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75} = 0,314 .$$

Молярні маси компонентів знаходимо з табл. 2 (див. додатки)

$$\mu_{CO_2} = 44 \text{ кг/кмоль; } \mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль.}$$

$$m_{O_2} = \frac{\mu_{O_2} \cdot r_{O_2}}{\mu_{O_2} \cdot r_{O_2} + \mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}} = \frac{32 \cdot 0,75}{32 \cdot 0,75 + 44 \cdot 0,25} = 0,686 .$$

Молярна маса суміші

$$\mu_c = \mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2} = 44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75 = 35 \text{ кг/кмоль.}$$

Газова стала суміші

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c} = 238 \text{ Дж/(кг·К).}$$

Густину суміші для заданих умов знайдемо з термічного рівняння (2.3)

$$\rho_c = \frac{p_c}{R_c \cdot T} = \frac{0,085 \cdot 10^6}{238 \cdot (100 + 273)} = 0,957 \text{ кг/м}^3.$$

Густина суміші при нормальних умовах

$$\rho_{c.н.} = \frac{\mu_c}{V_\mu} = \frac{35}{22,4} = 1,562 \text{ кг/м}^3.$$

2.4.3. Об'ємний склад продуктів згоряння палива такий: CO₂ = 15%; CO = 5%; H₂O = 12%; O₂ = 8%; N₂ = 60%. Визначити уявну молярну і газову

сталу, густину і питомий об'єм продуктів згоряння при $V = 750$ мм рт.ст. і температурі $t = 800^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Уявну молекулярну масу суміші визначимо за рівнянням

$$\mu_c = \sum_1^n r_k \cdot \mu_k = r_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} + r_{\text{CO}} \cdot \mu_{\text{CO}} + r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \mu_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{O}_2} \cdot \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2}.$$

Об'ємні частини компонентів r_k одержимо, розділивши об'ємні проценти кожного на 100 %

$$r_{\text{CO}_2} = 0,15; r_{\text{CO}} = 0,05; r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,12; r_{\text{O}_2} = 0,08; r_{\text{N}_2} = 0,6.$$

Молекулярні маси компонентів знаходимо з таблиці 2 (див. додатки)

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг/кмоль}; \mu_{\text{CO}} = 28 \text{ кг/кмоль}; \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ кг/кмоль};$$

$$\mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг/кмоль}; \mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг/кмоль}.$$

Отже,

$$\mu_c = 0,15 \cdot 44 + 0,05 \cdot 28 + 0,12 \cdot 18 + 0,08 \cdot 32 + 0,6 \cdot 28 = 29,54 \text{ кг/кмоль}.$$

Газову сталу суміші газів визначаємо за формулою

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c} = \frac{8314}{29,54} = 281,4 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Густину і питомий об'єм продуктів згоряння обчислимо за допомогою рівняння стану

$$p_c \cdot v_c = R_c \cdot T, \text{ звідки}$$

$$v_c = \frac{R_c \cdot T}{p_c} = \frac{281,4 \cdot 1073}{99750} = 3,02 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\text{де } p_c = B = 750 \cdot 133 = 99750 \text{ Па}; T = t + 273 = 800 + 273 = 1073 \text{ К},$$

$$\rho_c = \frac{1}{v_c} = \frac{1}{3,02} = 0,331 \text{ кг/м}^3 \text{ [3]}.$$

2.4.4. Газова суміш, яка складається з кисню масою 7,0 кг, водню масою 0,2 кг і деякої кількості вуглекислого газу при температурі 27°C під тиском 0,2 МПа, знаходиться в посудині місткістю 8 м^3 . Визначити кількість вуглекислого газу, парціальні тиски компонентів, масовий склад і газову сталу суміші.

Розв'язання

За рівнянням стану знаходимо парціальні тиски компонентів

$$p_{\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2} \cdot R_{\text{O}_2} \cdot T}{V} = \frac{7 \cdot 259,8 \cdot 300}{8} = 68197 \text{ Н/м}^2 = 0,068 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{H}_2} = \frac{M_{\text{H}_2} \cdot R_{\text{H}_2} \cdot T}{V} = \frac{0,2 \cdot 4157 \cdot 300}{8} = 31177,6 \text{ Н/м}^2 = 0,031 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{CO}_2} = p_c - p_{\text{O}_2} - p_{\text{H}_2} = 0,2 - 0,068 - 0,031 = 0,101 \text{ МПа}.$$

Маса вуглекислого газу

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{p_{\text{CO}_2} \cdot V}{R_{\text{CO}_2} \cdot T} = \frac{0,101 \cdot 10^6 \cdot 8}{188,9 \cdot 300} = 14,25 \text{ кг.}$$

Отже, загальна маса газової суміші

$$M_c = 7 + 0,2 + 14,25 = 21,45 \text{ кг.}$$

Масові частки компонентів

$$\text{кисню } m_{\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_c} = \frac{7}{21,45} = 0,326;$$

$$\text{вуглекислого газу } m_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_c} = \frac{14,25}{21,45} = 0,664;$$

$$\text{водню } m_{\text{H}_2} = \frac{M_{\text{H}_2}}{M_c} = \frac{0,2}{21,45} = 0,009.$$

Перевірка: $0,326 + 0,664 + 0,009 = 0,999 \approx 1$.

Газова стала суміші

$$R_c = m_{\text{O}_2} \cdot R_{\text{O}_2} + m_{\text{H}_2} \cdot R_{\text{H}_2} + m_{\text{CO}_2} \cdot R_{\text{CO}_2} = 0,326 \cdot 259,8 + 0,009 \cdot 4157 + 0,664 \cdot 188,9 = 247,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

2.4.5. Визначити масовий склад газової суміші, яка складається з вуглекислого газу й азоту, якщо відомо, що парціальний тиск вуглекислого газу 120 кПа, а тиск суміші 300 кПа.

Розв'язання

Парціальний тиск азоту визначасмо з рівняння (2.4)

$$p_{\text{N}_2} = p_c - p_{\text{CO}_2} = 300 - 120 = 180 \text{ кПа.}$$

Парціальний тиск компонента пов'язаний з його об'ємною часткою співвідношенням: $p_k = r_k \cdot p_c$, звідки

$$r_k = \frac{p_k}{p_c}.$$

Об'ємні частки компонентів переведемо в масові за формулою

$$m_k = \frac{r_k \cdot \mu_k}{\sum_1^n r_k \cdot \mu_k} \quad \text{або} \quad m_k = \frac{p_k \cdot \mu_k}{p_c \cdot \sum_1^n \frac{p_k \cdot \mu_k}{p_c}} = \frac{p_k \cdot \mu_k}{\sum_1^n p_k \cdot \mu_k}.$$

Врахувавши значення молекулярних мас $\mu_{\text{CO}_2} = 44$ кг/кмоль, $\mu_{\text{N}_2} = 28$ кг/кмоль знайдемо масовий склад суміші

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{120 \cdot 44}{120 \cdot 44 + 180 \cdot 28} = \frac{5280}{10320} = 0,512 ;$$

$$m_{\text{N}_2} = \frac{5040}{10320} = 0,488 .$$

2.4.6. Масовий склад суміші, що знаходиться при нормальних умовах, такий: $\text{CO}_2 = 18\%$, $\text{O}_2 = 12\%$, $\text{N}_2 = 70\%$. До якого тиску треба стиснути цю суміш, щоб при $t = 180^\circ\text{C}$ 8 кг її зайняли об'єм, рівний 4 м^3 .

Розв'язання

Визначимо масу кожного компонента, користуючись рівнянням (2.5)

$$M_{\text{CO}_2} = 8 \cdot 0,18 = 1,44 \text{ кг}; M_{\text{O}_2} = 8 \cdot 0,12 = 0,96 \text{ кг}; M_{\text{N}_2} = 8 \cdot 0,7 = 5,6 \text{ кг}.$$

Густину кожного компонента (кг/м^3) при нормальних умовах знаходимо з табл. 2 (див. додатки)

$$\rho_{\text{CO}_2} = 1,977; \rho_{\text{O}_2} = 1,429; \rho_{\text{N}_2} = 1,251.$$

Обчислимо об'єми компонентів і об'єм суміші при нормальних умовах

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} = \frac{1,44}{1,997} = 0,728 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2}}{\rho_{\text{O}_2}} = \frac{0,96}{1,429} = 0,671 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{M_{\text{N}_2}}{\rho_{\text{N}_2}} = \frac{5,6}{1,251} = 4,476 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{H}} = 0,728 + 0,671 + 4,476 = 5,875 \text{ м}^3.$$

Запишемо термічне рівняння для суміші при нормальних і заданих умовах

$$p_{\text{H}} \cdot V_{\text{H}} = M \cdot R \cdot T_{\text{H}}, \quad p \cdot V = M \cdot R \cdot T.$$

Поділимо перше рівняння на друге

$$\frac{p_{\text{H}} \cdot V_{\text{H}}}{p \cdot V} = \frac{T_{\text{H}}}{T}.$$

$$\text{Звідки } p = \frac{p_{\text{H}} \cdot V_{\text{H}} \cdot T}{V \cdot T_{\text{H}}} = \frac{0,101 \cdot 5,875 \cdot (180 + 273)}{4 \cdot 273} = 0,25 \text{ МПа},$$

де $p_{\text{H}} = 0,101 \text{ МПа}$; $T_{\text{H}} = 273 \text{ К}$.

2.4.7. Знайти парціальні тиски компонентів, газову сталу суміші, яка складається з азоту і кисню, об'єми яких відповідно $0,5\text{ м}^3$ і $0,8\text{ м}^3$. Тиск суміші дорівнює $p_c = 0,5 \text{ МПа}$.

Розв'язання

Об'єм суміші $V_c = V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 0,5 + 0,8 = 1,3 \text{ м}^3$.

Об'ємні частки компонентів

$$r_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_c} = \frac{0,5}{1,3} = 0,385;$$

$$r_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_c} = \frac{0,8}{1,3} = 0,615.$$

Молекулярна маса суміші

$$\mu_c = r_{N_2} \cdot \mu_{N_2} + r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} = 0,385 \cdot 28 + 0,615 \cdot 32 = 30,46 \text{ кг/кмоль,}$$

де $\mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль; } \mu_{N_2} = 28 \text{ кг/кмоль}$ (табл. 2, див. додатки)

Питома газова стала суміші

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c} = \frac{8314}{30,46} = 273 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Парціальні тиски компонентів

$$p_{N_2} = r_{N_2} \cdot p_c = 0,385 \cdot 0,5 = 0,193 \text{ МПа;}$$

$$p_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_c = 0,307 \text{ МПа.}$$

2.4.8. В резервуарі місткістю $V = 4,5 \text{ м}^3$ знаходиться коксовий газ при тиску $p_1 = 2,3 \text{ МПа}$ і при температурі $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Об'ємний склад газу такий: $r_{H_2} = 12,5 \%$, $r_{CH_4} = 8 \%$, $r_{CO} = 4,5 \%$, $r_{N_2} = 75 \%$. Після витрачення деякої кількості газу його тиск знизився до $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$, а температура впала до $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити масу витраченого газу.

Розв'язання

Маси коксового газу до і після того, як частину газу витратили, визначимо з характеристичного рівняння, записаного для двох різних станів

$$M_1 = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1}, \quad M_2 = \frac{p_2 \cdot V}{R \cdot T_2}.$$

Маса витраченого газу

$$\Delta M = M_1 - M_2 = \frac{V}{R} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right),$$

де газова стала суміші

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c} = \frac{8314}{\sum_1^n r_k \cdot \mu_k} = \frac{8314}{r_{H_2} \cdot \mu_{H_2} + r_{CH_4} \cdot \mu_{CH_4} + r_{CO} \cdot \mu_{CO} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}} =$$

$$= \frac{8314}{0,125 \cdot 2 + 0,08 \cdot 16 + 0,045 \cdot 28 + 0,75 \cdot 28} = 349,5 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К},$$

де $\mu_{H_2} = 2 \text{ кг/кмоль; } \mu_{CH_4} = 16 \text{ кг/кмоль; } \mu_{CO} = 28 \text{ кг/кмоль;}$

$\mu_{N_2} = 28 \text{ кг/кмоль.}$

Шукана маса втраченого коксового газу

$$\Delta M = \frac{4,5}{349,5} \left(\frac{2,3 \cdot 10^6}{350 + 273} - \frac{0,8 \cdot 10^6}{50 + 273} \right) = 15,8 \text{ кг.}$$

2.4.9. Аналіз топкових газів показав об'ємний склад: $r_{CO_2} = 12,2 \%$, $r_{CO} = 0,4 \%$, $r_{O_2} = 7,1 \%$. Четвертий компонент – азот. Визначити масовий склад суміші.

Розв'язання

Оскільки четвертим компонентом є азот, об'ємний склад якого являє собою доповнення до одиниці, то

$$r_{N_2} = 1 - r_{CO_2} - r_{O_2} - r_{CO} = 1 - 0,122 - 0,071 - 0,004 = 0,803.$$

Молекулярна маса суміші дорівнює

$$\mu_c = r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} + r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + r_{CO} \cdot \mu_{CO} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2} = 0,122 \cdot 44 + 0,071 \cdot 32 + 0,004 \cdot 28 + 0,803 \cdot 28 = 30,28 \text{ кг/кмоль},$$

$$\text{де } \mu_{CO_2} = 44 \text{ кг/кмоль}; \mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль}; \mu_{CO} = 28 \text{ кг/кмоль};$$

$$\mu_{N_2} = 28 \text{ кг/кмоль}.$$

Масова частка кожного компонента визначається за формулою

$$m = \frac{\mu_k \cdot r_k}{\mu_c}$$

$$m_{CO_2} = r_{CO_2} \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_c} = 0,122 \cdot \frac{44}{30,28} = 0,177 (17,7\%);$$

$$m_{O_2} = r_{O_2} \frac{\mu_{O_2}}{\mu_c} = 0,071 \cdot \frac{32}{30,28} = 0,075 (7,5\%);$$

$$m_{CO} = r_{CO} \frac{\mu_{CO}}{\mu_c} = 0,004 \cdot \frac{28}{30,28} = 0,0037 (0,37\%);$$

$$m_{N_2} = r_{N_2} \frac{\mu_{N_2}}{\mu_c} = 0,803 \cdot \frac{28}{30,28} = 0,744 (74,4\%).$$

Перевірка

$$m_{CO_2} + m_{O_2} + m_{CO} + m_{N_2} = 0,177 + 0,075 + 0,0037 + 0,744 \approx 1 (100\%).$$

2.4.10. Посудина розділена перегородкою на дві частини, об'єми яких дорівнюють $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$ і $V_2 = 1,0 \text{ м}^3$. В частині V_1 знаходиться двоокис вуглецю CO_2 при тиску $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, а в частині V_2 кисень O_2 при тиску $p_2 = 0,2 \text{ МПа}$ і температурі $t_2 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$.

Визначити масові і об'ємні частки CO_2 і O_2 , уявну молярну масу суміші і її газову сталу, якщо буде убрана перегородка і процес змішування закінчиться [4].

Розв'язання

Маси газів розраховуються з термічного рівняння стану (1.15)

$$M_{CO_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_1 \cdot T_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{189 \cdot (273 + 30)} = 13,1 \text{ кг}.$$

$$M_{O_2} = \frac{p_2 \cdot V_2}{R_2 \cdot T_2} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 1,0}{260 \cdot (273 + 57)} = 2,33 \text{ кг},$$

$$\text{де } R_1 = \frac{8314}{\mu_{CO_2}} = \frac{8314}{44} = 189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); R_2 = \frac{8314}{\mu_{O_2}} = \frac{8314}{32} = 260 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Масові частки

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{\sum_{k=1}^n M_k} = \frac{13,1}{13,1 + 2,33} = 0,848;$$

$$m_{\text{O}_2} = \frac{M_{\text{O}_2}}{\sum_{k=1}^n M_k} = \frac{2,33}{13,1 + 2,33} = 0,151.$$

Об'ємні частки

$$r_{\text{O}_2} = \frac{\frac{m_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}}}{\sum_{k=1}^n \frac{m_k}{\mu_k}} = \frac{\frac{0,151}{32}}{\frac{0,848}{44} + \frac{0,151}{32}} = 0,198;$$

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{\frac{m_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{CO}_2}}}{\sum_{k=1}^n \frac{m_k}{\mu_k}} = \frac{\frac{0,848}{44}}{\frac{0,848}{44} + \frac{0,151}{32}} = 0,802.$$

Уявна молярна маса і газова стала суміші

$$\mu_c = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{m_k}{\mu_k}} = \frac{1}{\frac{0,848}{44} + \frac{0,151}{32}} = 41,66 \text{ кг/кмоль.}$$

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c} = \frac{8314}{41,66} = 199,6 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К).}$$

2.5. Задачі

2.5.1. Об'ємний склад сухих продуктів згоряння палива (що не містять водяної пари) такий: CO_2 ; O_2 ; N_2 . Відсотковий вміст цих газів див. у табл. 2.2. Знайти уявну молекулярну масу і газову сталу, а також густину і питомий об'єм продуктів згоряння при барометричному тиску навколишнього середовища B та температурі газів t_1 .

2.5.2. Газ коксових печей має такий об'ємний склад: H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , NO_2 (табл. 2.2). Визначити уявну молекулярну масу, масові частки, газову сталу, густину і величину парціальних тисків при температурі t_1 і тиску p_1 .

2.5.3. Визначити газову сталу, питомий об'єм газової суміші та величину парціальних тисків її компонентів, якщо масовий склад суміші такий: CH_4 , CO , O_1 , N_1 (див. табл. 2.2), а загальний тиск дорівнює p_1 при температурі t_1 .

2.5.4. У резервуарі об'ємом V міститься коксовий газ, тиск якого дорівнює p_2 , а температура t_2 . Об'ємний склад газу такий: H_2 , CH_4 , CO , N_2 (табл. 2.2). Після витрачання деякої кількості газу його тиск знизився до p_1 , а температура впала до t_1 . Визначити масу витраченого коксового газу.

Таблиця 2.2

Остання цифра цифра	H ₂ O, %	H ₂ , %	O ₂ , %	N ₂ , %	NO ₂ , %	CO, %	CO ₂ , %	CH ₄ , %	Передостання цифра	B, мм рт. ст.	t ₁ , °C	t ₂ , °C	p ₁ , МПа	p ₂ , МПа	V, м ³	p, кг/м ³
0	8,0	12,5	12,5	75,0	62,5	4,5	12,5	8,0	0	750	50	350	0,8	2,3	4,5	2,5
1	5,6	10,3	10,3	80,5	72,3	4,6	9,2	4,6	1	745	40	400	0,3	3,5	1,9	1,9
2	8,0	9,0	9,0	76,0	61,0	7,0	15,0	8,0	2	735	60	450	0,5	1,8	3,5	2,6
3	8,0	9,5	9,5	73,5	56,5	9,0	17,0	8,0	3	755	70	550	0,6	1,5	4,0	2,0
4	10,0	15,4	15,4	68,0	51,4	6,6	16,6	10,0	4	740	80	500	0,2	1,1	5,1	2,8
5	10,5	17,0	17,0	63,0	43,0	9,5	20,0	10,5	5	730	35	530	0,4	3,1	5,4	3,0
6	4,5	17,5	17,5	73,0	63,5	5,0	9,5	4,5	6	755	45	320	0,7	1,8	6,0	1,7
7	3,5	9,5	9,5	84,0	77,5	3,0	6,5	3,5	7	740	54	380	0,65	2,1	7,0	2,8
8	10,0	20,1	20,1	60,0	40,1	9,9	19,9	10,0	8	750	63	430	0,35	2,0	7,5	3,5
9	12,0	17,8	17,8	60,2	38,2	10,0	22,0	12,0	9	760	55	560	0,55	2,7	8,3	3,3

2.5.5. Масовий склад суміші такий: CO_2 , O_2 , N_2 (табл. 2.2). До якого значення тиску потрібно стиснути цю суміш за нормальних умов, щоб при температурі t_1 її кількість масою 18 кг займала об'єм, який дорівнює V .

2.5.6. Газова суміш має такий масовий склад: CO_2 , H_2 , N_2 (табл. 2.2). До якого значення тиску потрібно стиснути цю суміш за нормальних умов, щоб при температурі t_1 густина її дорівнювала величині ρ ?

2.5.7. Склад продуктів згоряння органічного палива задано в таких об'ємних частках: CO_2 , O_2 , N_2 (табл. 2.2). Знайти уявну молекулярну масу, газову сталу і питомий об'єм продуктів згоряння, а також значення парціальних тисків її компонентів, якщо тиск і температура згоряння палива дорівнюють p_1 і t_1 відповідно.

2.5.8. Обчислити значення газової сталої: уявну молекулярну масу й густину суміші газів за нормальних умов, якщо температура суміші дорівнює t_1 , а тиску p_1 . Суміш газу задано таким масовим складом: CO_2 , H_2 , N_2 (табл. 2.2).

2.5.9. Суміш задано в таких об'ємних частках: CO_2 , H_2 , N_2 (табл. 2.2), вона має температуру t_1 . Обчислити істинні значення молярної та масової теплоємності при постійному тиску та об'ємі суміші.

2.5.10. Газова суміш має такий склад за об'ємом: CO , O_2 , N_2 , H_2O (табл. 2.2). Визначити середню масову теплоємність c_{pm} і c_{vm} , якщо температура суміші підвищується від t_1 до t_2 .

3. РОБОТА І ТЕПЛОТА. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Викладено короткі теоретичні відомості про способи передачі енергії в термодинамічних системах; внутрішню енергію та аналітичний запис першого закону; аналітичний запис роботи як функції процесу та її графічне представлення; методи визначення тепла процесу; теплоємність газів; параметри стану ентальпія та ентропія; графічне зображення тепла процесу та його залежність від виду процесу.

Мета – сформуванати знання про способи передачі енергії в термодинамічних системах; внутрішню енергію та аналітичний запис першого закону; аналітичний запис роботи як функції процесу та її графічне представлення; методи визначення тепла процесу; теплоємність газів; параметри стану ентальпія та ентропія; графічне зображення тепла процесу та його залежність від виду процесу.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- розраховувати внутрішню енергію робочої речовини;
- визначати роботи процесу та зображувати її графічно;
- визначати тепло процесу та зображувати його графічно;
- визначати параметри стану ентальпію та ентропію.

3.1. Короткі теоретичні відомості

При взаємодії термодинамічної системи з навколишнім середовищем відбувається передача енергії від системи до зовнішніх тіл, при цьому один зі способів її передачі робота, а інший – теплота.

Перший спосіб передачі енергії добре відомий з механіки і являє собою процес силового застосування одного тіла на інше, в результаті чого робиться переміщення другого тіла. При цьому одне тіло здійснює над іншим тілом механічну роботу L , яка вимірюється здобутком сили, що діє на тіло, на путь переміщення точки прикладання сили.

В технічній термодинаміці робота здійснюється газом або паром при зміні об'єму тіла (розширення або стиск газу). В такому випадку прийнято рахувати роботу, яка віддається тілом – позитивною, а робота, яка здійснюється над тілом – негативною. Одиницею виміру роботи є джоуль (кілоджоуль).

Другий спосіб передачі енергії пов'язаний з присутністю різниці температур. Передача енергії в такому випадку здійснюється при безпосереднім контакті тіл, які мають відмінну температуру, або за допомогою випромінювання. В такому випадку кількість переданої енергії називають теплотою Q .

Прийнято кількість теплоти, яке одержано тілом, рахувати позитивним, а теплоту, яка віддана тілом – негативною. Одиницею виміру кількості теплоти є джоуль (кілоджоуль).

Хоча робота L і кількість теплоти Q мають розмірність енергії, вони не є видами енергії на відміну від енергії, що є параметром стану системи, робота і теплота залежать від шляху переходу системи від одного стану в інший. Вони представляють дві форми передачі енергії від одного тіла (або речовини) до іншого.

У першому випадку має місце макрофізична форма обміну енергією, що обумовлена механічним впливом однієї системи на іншу, супроводжуваним видимим переміщенням деякого тіла (наприклад, поршня в циліндрі двигуна).

В другому випадку здійснюється мікрофізична (на молекулярному рівні) форма передачі енергії. Ці два способи передачі енергії еквівалентні, але нерівноцінні. Робота може безпосередньо перетворюватися в теплоту або в інший вид енергії. Теплота безпосередньо, тобто без попереднього перетворення в роботу може витратитися тільки на зміну внутрішньої енергії системи [1].

Обчислення роботи

Для кількісної міри механічної роботи проти зовнішніх сил в термодинамічному процесі відомі такі вирази:

Для довільної кількості газу (пари)

$$dL = p \cdot dV, \text{ Дж, звідки}$$

$$L = \int p \cdot dV, \text{ Дж} \quad (3.1)$$

для 1 кг речовини

$$dl = p \cdot dv, \text{ Дж/кг, звідки } l = \int p \cdot dv.$$

Для кінцевого процесу, в якому об'єм змінюється від v_1 до v_2 , загальний вираз для роботи буде

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv, \text{ Дж/кг} \quad (3.2)$$

В загальному випадку тиск p – величина змінна і залежить від v . Для обчислення інтеграла (3.2) потрібно знати залежність між ними в даному процесі, тобто рівняння процесу $p = \varphi(v)$. Графічно ця залежність може бути зображена в p - v координатах в загальному випадку кривою 1-2 (рис. 3.1).

Очевидно, що робота буде залежати від характеру кривої процесу і визначиться в p - v координатах площею, яка обмежена двома ординатами і віссю абсцис, тобто

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv = \text{пл. } 12v_2v_11.$$

З виразу (3.2) виходить наступне, що величина l має той знак, що і dv , тому що абсолютний тиск p завжди позитивний. Отже, робота розширення позитивна ($dv > 0$), робота стиску негативна ($dv < 0$).

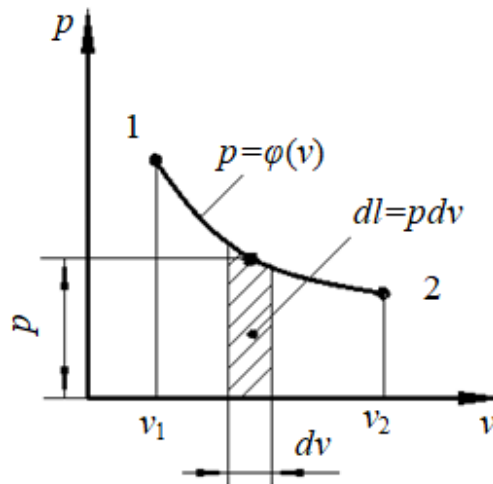


Рисунок 3.1 – До обчислення роботи в термодинамічному процесі

Обчислення кількості теплоти

Для визначення кількості теплоти в термодинамічних процесах використовують параметр стану речовини – ентропію S , яка грає роль координати стану [4].

В термодинамічному процесі елементарна кількість теплоти dQ може бути знайдено у вигляді добутку:

$$dQ = T \cdot dS, \text{ Дж} \quad (3.3)$$

для 1 кг речовини (питома кількість теплоти)

$$dq = T \cdot ds, \text{ Дж/кг} \quad (3.4)$$

Для кінцевого процесу, в якому ентропія змінюється від s_1 до s_2 загальний вираз для кількості тепла приймає вигляд

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T \cdot ds, \text{ Дж/кг} \quad (3.5)$$

Тому що абсолютна температура T завжди позитивна, знак величини теплоти буде визначатися знаком зміни ентропії. Процес збільшення ентропії ($ds > 0$) визначає підвід теплоти до речовини, тобто кількість теплоти має позитивний знак ($dq > 0$ і $q > 0$). Процес зменшення ентропії ($ds < 0$) відповідає відводу теплоти від речовини, тобто має негативний знак ($dq < 0$ і $q < 0$).

В загальному випадку температура T є змінною величиною, тому для обчислення інтегралу (3.5) треба в кожному конкретному термодинамічному процесі знати залежність між ентропією s і температурою T , тобто рівняння процесу в $T-s$ координатах $s = \varphi(T)$. В загальному випадку графічно ця залежність може бути зображена в $T-s$ координатах кривою 1-2 (рис.3.2).

Подібно тому як на $p-v$ діаграмі площа, яка обмежена кривою процесу і віссю абсцис, відображає роботу, на $T-s$ діаграмі площа, яка обмежена кривою процесу, віссю абсцис і двома ординатами, відповідає кількості теплоти, яка приймає участь у процесі, тобто

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T \cdot ds = \text{пл. } 1 s_1 s_2 21 .$$

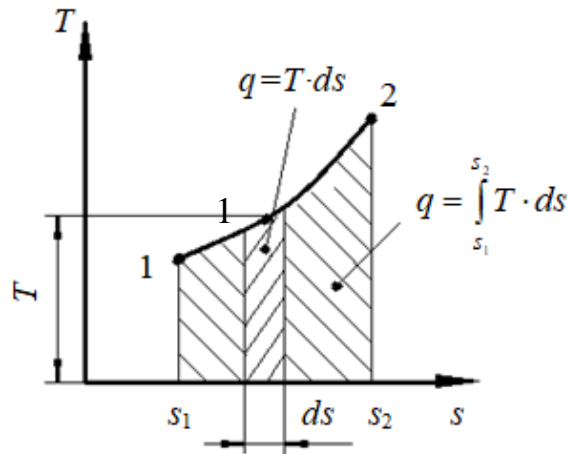


Рисунок 3.2 – До визначення теплоти в термодинамічному процесі

Другий спосіб обчислення теплоти пов'язаний з поняттям теплоємності речовини (робочого тіла) в термодинамічному процесі.

Кількість теплоти визначається з формул:

для довільної кількості речовини

$$Q = M \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \text{ Дж(кДж)}, \quad (3.6)$$

де c – питома теплоємність, Дж/(кг·К); T_2, T_1 – температури речовини на початку і в кінці процесу (К);

для 1 кг речовини

$$q = c \cdot (T_2 - T_1), \text{ Дж/кг (кДж/кг)}. \quad (3.7)$$

Поняття теплоємності і її значення будуть розглянуті нижче.

Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки є окремим випадком загального закону збереження і перетворення енергії стосовно до процесів, що відбуваються у термодинамічних системах.

У загальному випадку він сформульований так:

повна енергія ізольованої термодинамічної системи при будь-яких процесах, що відбуваються в системі, залишається постійною, тобто

$$E = \text{const} \text{ або } E_2 - E_1 = 0, \quad (3.8)$$

де E_1 і E_2 – відповідно повна енергія системи в початковому і кінцевому станах.

В теорії технічної термодинаміки приймається, що термодинамічні процеси ідеальних газів відбуваються в закритих системах.

Рівняння першого закону термодинаміки для закритої системи, яка переміщається у просторі в диференціальній формі, має такий вигляд [5]

$$dQ = dU + M \cdot \frac{dw^2}{2} + dL, \quad (3.9)$$

де dQ – кількість тепла, що підводиться або відводиться від термодинамічної системи (газу) у процесі зміни його стану; dU – зміна внутрішньої енергії газу; dL – робота, яка здійснюється газом або над газом; w – швидкість переміщення газу; $M \cdot \frac{dw^2}{2}$ – зміна кінетичної енергії газу при переміщенні просторі.

В кінцевому вигляді рівняння записується так

$$Q = \Delta U + \frac{M \cdot dw^2}{2} + L. \quad (3.10)$$

Рівняння першого закону термодинаміки (3.10) у такому вигляді використовується при вивченні процесів, які відбуваються у газових потоках (витікання газів і парів крізь сопла).

При дослідженні процесів зміну стану в термодинамічній системі, яка перебуває в спокою (наприклад, газ в циліндрах двигунів внутрішнього згорання, повітря в циліндрах компресорів та інш.) зміна кінетичної енергії газу

$M \cdot \frac{dw^2}{2}$ дорівнює нулеві і рівняння (3.10) записується у такому вигляді

$$Q = \Delta U + L. \quad (3.11)$$

Рівняння першого закону термодинаміки для 1 кг записується у диференціальній формі:

$$dq = du + dl = du + p \cdot dv, \quad (3.12)$$

у кінцевому вигляді

$$q = \Delta u + l. \quad (3.13)$$

Таким чином, для закритої термодинамічної системи теплота, що передається їй, йде на зміну внутрішньої енергії і на здійснення зовнішньої роботи.

3.2. Методичні рекомендації до розв'язування задач

При вивченні цієї теми студент повинен запам'ятати, що поняття роботи і теплоти не є видами енергії, а використовуються в термодинаміці як способи передачі енергії від одного тіла (або речовини) до іншого. При обчисленні кількості роботи в термодинамічних процесах її величина при розширенні набуває позитивне значення і графічно зображується в p - v координатах у вигляді площі.

При обчисленні кількості теплоти, яка приймає участь в термодинамічних процесах треба твердо пам'ятати, що теплота яка підводиться до газу набуває позитивне значення, яка відводиться від газу – негативне значення, а знак зміни ентропії і теплоти збігаються. Кількість теплоти графічно зображується площею в T - s координатах.

Треба усвідомити, що кількість теплоти в термодинамічних процесах також можна розрахувати користуючись поняттям теплоємність, або за допомогою рівняння першого закону термодинаміки.

Треба уміти користуватися першим законом термодинаміки при аналізі термодинамічних процесів, які відбуваються в системі, що перебуває в стані спокою, а також в системі, що переміщується у просторі (у газових потоках). Приклади задач по цієї теми окремо не надаються, тому що рівняння для обчислення роботи, теплоти, перший закон термодинаміки будуть використовуватись в прикладах задач в подальших розділах збірника.

3.3. Питання для самоконтролю

3.3.1. Якими способами відбувається передача енергії від термодинамічної системи до зовнішніх тіл?

3.3.2. За якою формулою обчислюється робота в довільному термодинамічному процесі?

3.3.3. Як графічно зображується робота в p - v координатах?

3.3.4. В якому випадку робота в термодинамічному процесі позитивна, а в якому негативна?

3.3.5. Формули для обчислення кількості теплоти у довільному термодинамічному процесі?

3.3.6. Що зображує площа під кривою процесу на T - s діаграмі?

3.3.7. В якому випадку кількість теплоти має позитивний знак, а в якому негативний знак?

3.3.8. Формулювання першого закону термодинаміки у загальному випадку.

3.3.9. Рівняння першого закону термодинаміки для закритої термодинамічної системи, яка переміщається у просторі.

3.3.10. Рівняння першого закону термодинаміки для закритої термодинамічної системи, яка перебуває у спокої.

3.3.11. Формулювання першого закону для термодинамічної системи, яка перебуває в спокої.

4. ТЕПЛОЄМНІСТЬ ГАЗІВ

Викладено короткі теоретичні відомості про сутність поняття теплоємності газів; види теплоємності; одиниці її вимірювання.

Мета – сформулювати знання про теплоємність газів. Засвоїти фактори, які впливають на теплоємність газів і класифікацію теплоємності.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- розраховувати теплоємність робочої речовини;
- розраховувати теплоємність робочої речовини в залежності від характеру процесу;
- визначати істинну і середню теплоємність, як окремих газів, так і газової суміші.

4.1. Короткі теоретичні відомості

Теплоємністю називають кількість тепла, яке необхідно надати речовині (газу), щоб підвищити температуру будь-якої її кількісної одиниці на один Кельвін або один градус.

Залежно від обраної одиниці газу (1 кг, 1 м³, 1 кмоль) розрізняють:

масову теплоємність c , кДж/(кг·К);

об'ємну теплоємність c' , кДж/(м³·К);

мольну теплоємність $_{\mu}c$, кДж/(кмоль·К).

Між собою ці теплоємності зв'язані співвідношеннями

$$c = \frac{_{\mu}c}{\mu}; \quad c' = \frac{_{\mu}c}{22,4}; \quad c' = \frac{c}{v_H}, \quad (4.1)$$

де v_H – питомий об'єм при нормальних умовах.

Теплоємність газу залежить від його температури. Розрізняють теплоємності істинні, що визначаються для заданої температури, і середні, що визначаються для інтервалу температур, в межах якого відбувається процес підведення або відведення тепла.

Теплоємність ідеальних газів не залежить від їх температури, а залежить від їх атомності та характеру процесу. Теплоємність реальних газів залежить від їх температури, природних властивостей, характеру процесу.

Залежно від виду процесу, в якому підводиться або відводиться тепло, розрізняють теплоємності ізобарні істинні й середні та ізохорні істинні й середні [6].

Види теплоємностей та їх позначення наведені в табл. 4.1.

Зв'язок між теплоємністю при сталих об'ємі і тиску виражається співвідношеннями

$$c_p - c_v = R - \text{рівняння Майєра}, \quad (4.2)$$

$$_{\mu}c_p - _{\mu}c_v = R_{\mu}. \quad (4.3)$$

Таблиця 4.1 – Класифікація теплоємностей

Теплоємність	Масова, кДж/(кг·К)		Об’ємна, кДж/(м ³ ·К)		Мольна, кДж/(кмоль·К)	
	істинна	середня	істинна	середня	істинна	середня
ізохорна	c_v	c_{vm}	c'_v	c'_{vm}	μc_v	μc_{vm}
ізобарна	c_p	c_{pm}	c'_p	c'_{pm}	μc_p	μc_{pm}

Іноді при розрахунках ідеальних термодинамічних процесів та циклів залежністю від температури нехтують і значення теплоємностей приймають сталими. В такому випадку значення масових і об’ємних теплоємностей розраховують за допомогою мольних теплоємностей по формулам 4.1. Значення сталих мольних теплоємностей [3] μc_v і μc_p , які одержані на підставі молекулярно-кінетичної теорії теплоємностей, наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Гази	μc_v , кДж/(кмоль·К)	μc_p , кДж/(кмоль·К)	k
Одноатомні	12,5	20,8	1,66
Двоатомні	20,8	29,1	1,4
Три-і багатоатомні	29,1	37,4	1,29

В технічній термодинаміці велике значення має відношення масової ізобарної і ізохорної теплоємностей, яке позначається буквою k

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v}. \quad (4.4)$$

Для визначення істинної теплоємності звичайно надається рівняння виду

$$c = a + b \cdot t + d \cdot t^2, \quad (4.5)$$

де a, b і d – величини, які стали для даного газу.

В теплотехнічних розрахунках нелінійну залежність (4.5) теплоємності від температури заміняють близькою до неї лінійною залежністю. В такому випадку істинна теплоємність визначається з рівняння, яке є приблизним

$$c = a + b \cdot t, \quad (4.6)$$

А для визначення середньої теплоємності при зміні температури від t_1 до t_2 користуються рівнянням

$$c_{xm} = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2), \quad (4.7)$$

де x – приймає позначку p , або v в залежності від характеру процесу (для ізохорного c_{vm} , для ізобарного c_{pm}).

Для середньої теплоємності в межах $0 - t$ °С ця формула приймає вид

$$c_{xm} = a + \frac{b}{2} \cdot t. \quad (4.8)$$

Рівняння для визначення приблизного значення середніх масових і об'ємних теплоємностей в інтервалі температур від t_1 до t_2 наведені в табл. 11 (див. додатки).

Для розрахунку точного значення середньої теплоємності в інтервалі температур $t_1 - t_2$ для реальних газів користуються формулою

$$c_{xm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}, \quad (4.9)$$

де q_{1-2} – кількість тепла, підведеного (відведеного) до одиниці кількості речовини робочого тіла для підігрівання (охолодження) його від температури t_1 до температури t_2 .

Для практичних розрахунків точне значення середньої теплоємності знаходять за формулою

$$c_{xm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{xm2} \cdot t_2 - c_{xm1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \quad (4.10)$$

де $c_{xm1} \cdot t_1$ і $c_{xm2} \cdot t_2$ – середні значення теплоємностей відповідно в інтервалах температур $0 - t_2$ і $0 - t_1$.

Кількість тепла, витраченого в процесі при незмінному об'ємі і сталому тиску розраховують за формулами

$$q_v = c_{vm2} \cdot t_2 - c_{vm1} \cdot t_1;$$

$$q_p = c_{pm2} \cdot t_2 - c_{pm1} \cdot t_1,$$

де c_{vm1} і c_{vm2} – середні значення масових ізохорних теплоємностей в інтервалах температур $0 - t_2$ і $0 - t_1$; c_{pm1} і c_{pm2} – середні значення масових ізобарних теплоємностей в інтервалах температур $0 - t_2$ і $0 - t_1$.

Середні значення мольних, об'ємних і масових ізохорних та ізобарних теплоємностей в інтервалах температур $0 - t_2$ і $0 - t_1$ визначаються з таблиць 4 – 10 (див. додатки).

Теплоємності газових сумішей

$$\text{- масова } c_{xm} = \sum_1^n m_k \cdot c_k ; \quad (4.11)$$

$$\text{- об'ємна } c'_{xm} = \sum_1^n r_k \cdot c'_k ; \quad (4.12)$$

$$\text{- мольна } \mu c_{xm} = \sum_1^n z_k \cdot \mu c_k , \quad (4.13)$$

де z_k – мольна частка компонента суміші.

4.2. Методичні рекомендації до розв'язування задач

При вивченні цієї теми слід твердо засвоїти, що теплоємність не є параметром стану робочого тіла. Теплоємність – фізична величина, котра

використовується для розрахунків кількості тепла, роботи в різних термодинамічних процесах. Необхідно знати, які фактори впливають на теплоємність газів і класифікацію теплоємності. Вміти визначати істинну і середню теплоємність, як окремих газів, так і газової суміші. Вихідні дані для самостійного розв'язування задач наведені в табл. 4.3.

4.3. Питання для самоконтролю

- 4.3.1. Що розуміють під поняттям "теплоємність"?
- 4.3.2. Як позначається теплоємність та в яких одиницях вона вимірюється?
- 4.3.3. Чому теплоємність не можна вважати параметром стану?
- 4.3.4. Перерахуйте види теплоємності.
- 4.3.5. Яким чином пов'язані між собою теплоємності c_p і c_v ?
- 4.3.6. Чому теплоємність c_p більша від теплоємності c_v ?
- 4.3.7. Яким чином пов'язані між собою масова і мольна теплоємності?
- 4.3.8. Як можна визначити мольну теплоємність ідеального газу?
- 4.3.9. У чому полягає відмінність між поняттями істинної теплоємності і середньої теплоємності?
- 4.3.10. Яке математичне вираження наближеного значення істинної та середньої теплоємностей?
- 4.3.11. Яким чином обчислюють точне значення середньої теплоємності?
- 4.3.12. Які фізичні величини потрібні для визначення теплоємності газової суміші?
- 4.3.13. З якою метою використовується поняття теплоємності?

4.4. Приклади розв'язування задач

4.4.1. Визначити масову теплоємність азоту N_2 в ізобарному та ізохорному процесах, вважаючи $c = \text{const}$.

Розв'язання

На основі формули (4.1) і даних таблиці 4.2 для двохатомних газів

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{N_2}} = \frac{20,8}{28} = 0,7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{N_2}} = \frac{29,1}{28} = 1,04 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4.4.2. Визначити масову теплоємність в ізобарному процесі і об'ємну в ізохорному процесі для водню H_2 , вважаючи $c = \text{const}$.

Розв'язання

$$\text{Масова ізобарна теплоємність} - c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{H_2}} = \frac{29,1}{2} = 14,55 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$\text{Об'ємна ізохорна теплоємність} - c'_v = \frac{\mu c_v}{22,4} = \frac{20,8}{22,4} = 0,93 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

4.4.3. Визначити масову теплоємність повітря в ізобарному та ізохорному процесах, вважаючи $c = \text{const}$.

Розв'язання

$$\text{Масова ізохорна теплоємність} - c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{\text{пов}}} = \frac{20,8}{29} = 0,72 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

$$\text{Масова ізобарна теплоємність} - c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{\text{пов}}} = \frac{29,1}{29} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

4.4.4. Визначити середню масову і середню об'ємну теплоємність кисню при сталому тиску для інтервалу температур 0 – 1000 °С, вважаючи залежність теплоємності від температури лінійною.

Розв'язання

Середня масова ізобарна теплоємність (на основі формули 4.8)

$$c_{pm}|_0^t = a + \frac{b}{2} \cdot t = 0,919 + 0,0001065 \cdot 1000 = 1,0255 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

середня об'ємна ізобарна теплоємність

$$c'_{pm}|_0^t = a + \frac{b}{2} \cdot t = 1,313 + 0,0001577 \cdot 1000 = 1,4707 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

Значення коефіцієнтів a і b в кисню для масової і об'ємної теплоємності знаходимо з таблиці 11 (див. додатки).

4.4.5. Обчислити середню масову ізобарну теплоємність c_{pm} для повітря в межах температур 200 – 800 °С, вважаючи залежність теплоємності від температури нелінійною.

Розв'язання

Середня теплоємність для повітря при незмінному тиску в межах $t_1 - t_2$ °С

становить $c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm2} \cdot t_2 - c_{pm1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$. Для повітря (див. додатки, табл. 10):

$$c_{pm}|_0^{800} = 1,0710 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \quad c_{pm}|_0^{200} = 1,0115 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \text{ звідси}$$

$$c_{pm}|_{200}^{800} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} = 1,091 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

4.4.6. Визначити середні теплоємності c_{pm} і c'_{pm} вуглекислого газу (CO_2) в межах 300 – 1000 °С, вважаючи залежність від температур:

а) не залежить; б) лінійною; в) нелінійною. Обчислити відносну похибку обчислення теплоємності по варіанту а) і б).

Розв'язання

а) в такому випадку теплоємність в термодинамічному процесі визначається за формулою (4.1)

$$c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{37,4}{44} = 0,85 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c'_{pm}|_{t_1}^{t_2} = c'_p = \frac{\mu c_p}{22,4} = \frac{37,4}{22,4} = 1,67 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

б) користуючись табл. 11 (див. додатки) і формулою (4.7), знаходимо наближене значення теплоємностей

$$c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} = a + \frac{b}{2} \cdot (t_1 + t_2) = 0,8725 + 0,0002406 \cdot (300 + 1000) = 1,185 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c'_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} = a + \frac{b}{2} \cdot (t_1 + t_2) = 1,7132 + 0,0004723 \cdot (300 + 1000) = 2,327 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

в) в такому випадку за формулою (4.10) обчислюється точне значення середньої теплоємності

$$c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm}\Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}\Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}; \quad c'_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c'_{pm}\Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c'_{pm}\Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}.$$

Скориставшись даними табл. 8 (див. додатки)

$$c_{pm}\Big|_0^{1000} = 1,1225 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad c_{pm}\Big|_0^{300} = 0,9487 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c'_{pm}\Big|_0^{1000} = 2,2035 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); \quad c'_{pm}\Big|_0^{300} = 1,8627 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}), \text{ звідси}$$

$$c_{pm}\Big|_{300}^{1000} = \frac{1,1225 \cdot 1000 - 0,9487 \cdot 300}{1000 - 300} = 1,197 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c'_{pm}\Big|_{300}^{1000} = \frac{2,2035 \cdot 1000 - 1,8627 \cdot 300}{1000 - 300} = 2,349 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Отже, відносна похибка для варіанту а):

$$\text{при обчисленні } c_{pm}: \quad \alpha = \frac{1,197 - 0,85}{1,197} \cdot 100\% = 29\%;$$

$$\text{при обчисленні } c'_{pm}: \quad \alpha = \frac{2,349 - 1,67}{2,349} \cdot 100\% = 29\%.$$

Для варіанту б):

$$\text{при обчисленні } c_{pm}: \quad \alpha = \frac{1,197 - 1,185}{1,197} \cdot 100\% = 1\%;$$

$$\text{при обчисленні } c'_{pm}: \quad \alpha = \frac{2,349 - 2,327}{2,349} \cdot 100\% = 0,9\%.$$

4.4.7. В посудині місткістю $V = 500 \text{ м}^3$ знаходиться водень (H_2) при тиску 5 бар і температурі $t_1 = 30^\circ\text{C}$. Яку кількість тепла слід підвести, щоб температура водню підвищилась до $t_2 = 400^\circ\text{C}$? Визначити також кінцевий тиск газу в посудині. Залежність теплоємності від температури вважати нелінійною.

Розв'язання

Кількість тепла, наданого водню при $v = \text{const}$ – $Q = V_{\text{H}} \cdot c'_{vm} \cdot (T_2 - T_1)$.

Об'єм газу в посудині зведемо до нормальних умов, тому що значення питомої об'ємної теплоємності в довідкових таблицях надається для нормальних умов ($p_{\text{H}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_{\text{H}} = 293 \text{ К}$).

$$\text{Отже, } V_{\text{H}} = \frac{p_1 \cdot V \cdot T_{\text{H}}}{p_{\text{H}} \cdot T_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 500 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (30 + 273)} = 23,6 \text{ м}^3.$$

Значення теплоємності знаходимо за формулою (4.10), користуючись даними таблиці 7 (див. додатки)

$$c'_{vm}|_{30}^{400} = \frac{c'_{vm}|_0^{400} \cdot 400 - c'_{vm}|_0^{30} \cdot 30}{400 - 30} = \frac{0,9311 \cdot 400 - 0,91 \cdot 30}{370} = 0,92 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Отже, обчислюємо кількість теплоти

$$Q = 2223,6 \cdot 0,92 \cdot (673 - 303) = 756913,4 \text{ кДж} = 756,9 \text{ МДж}.$$

Кінцевий тиск одержимо, якщо скористуємося термічним рівнянням для початкового і кінцевого станів водню $p_1 \cdot v = R \cdot T$; $p_1 \cdot v = R \cdot T$,

$$\text{звідси } \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}; p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{673}{303} = 11,1 \cdot 10^5 \text{ Па} = 11,1 \text{ бар}.$$

4.4.8. Повітря охолоджується від 400 °С до 100 °С у процесі зі сталим тиском. визначити кількість теплоти, яке втрачає 700 кг повітря, враховуючи, що в першому випадку теплоємність не залежить від температури ($c = const$), в другому випадку залежить нелінійно. Визначити також відносну похибку при обчисленні теплоємності в першому випадку.

Розв'язання

Шукану кількість теплоти знайдемо за рівнянням $Q = M \cdot c_{pm} \cdot (T_2 - T_1)$.

В першому випадку теплоємність визначається за формулою (4.1)

$$c_{pm} = c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{29} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отже, кількість відведеної теплоти в першому випадку

$$Q_1 = 700 \cdot 1 \cdot (373 - 673) = -210 \text{ МДж}.$$

Для другого випадку, користуючись формулою 4.10. і даними табл. 11 (див. додатки) знаходимо значення середньої теплоємності для інтервалу температур 100 – 400 °С

$$c_{pm}|_0^{400} = \frac{c_{pm}|_0^{400} \cdot 400 - c_{pm}|_0^{100} \cdot 100}{400 - 100} = \frac{1,0283 \cdot 400 - 1,0061 \cdot 100}{300} = 1,036 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отже, кількість відведеної теплоти в другому випадку

$$Q_2 = 700 \cdot 1,036 \cdot (373 - 673) = -217 \text{ МДж}.$$

Відносна похибка складає $\sigma = \frac{217 - 210}{217} = 3,2 \%$.

4.4.9. Об'ємні доли компонентів суміші ідеальних газів (при н.у.): 25% CO₂ і 75% O₂. Знайти середні масову і об'ємну теплоємності суміші для інтервалу температур від $t_1 = 500$ °С до $t_2 = 1000$ °С при $p = const$; кількість витраченої теплоти на нагрівання $M = 150$ кг суміші при $p = const$ в такому ж інтервалі температур.

Розв'язання

Середня об'ємна теплоємність суміші при $p = const$ у інтервалі температур від t_1 до t_2

$$c'_{pm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c'_{pm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - c'_{pm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1},$$

де $c'_{pm}|_0^{t_2} = \sum c'_{pmk}|_0^{t_2} \cdot r_k$, $c'_{pm}|_0^{t_1} = \sum c'_{pmk}|_0^{t_1} \cdot r_k$; $c'_{pmk}|_0^{t_2}$, $c'_{pmk}|_0^{t_1}$ – середні об'ємні теплоємності кожного компонента суміші в інтервалі температур від 0 до t_2 і від 0 до t_1 , відповідно, вибираються з таблиць 4,8 (див. додатки).

Об'ємні частки кожного компоненту суміші $r_{CO_2} = \frac{25\%}{100\%} = 0,25$, $r_{O_2} = 0,75$.

Отже, $c'_{pm}|_0^{1000} = 2,2035 \cdot 0,25 + 1,4775 \cdot 0,75 = 1,6589$ кДж/(м³·К);

$c'_{pm}|_0^{500} = 1,9887 \cdot 0,25 + 1,3980 \cdot 0,75 = 1,5457$ кДж/(м³·К);

$c'_{pm}|_{500}^{1000} = \frac{1,6589 \cdot 1000 - 1,5457 \cdot 500}{1000 - 500} = 1,772$ кДж/(м³·К).

Середня масова теплоємність суміші при $p = \text{const}$ у інтервалі температур від t_1 до t_2

$$c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_{pm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1},$$

де $c_{pm}|_0^{t_2} = \sum c_{pmk}|_0^{t_2} \cdot m_k$, $c_{pm}|_0^{t_1} = \sum c_{pmk}|_0^{t_1} \cdot m_k$, $c_{pmk}|_0^{t_2}$, $c_{pmk}|_0^{t_1}$ – середні масові теплоємності кожного компонента суміші в інтервалі температур від 0 до t_2 і від 0 до t_1 , відповідно, вибираються з таблиці 5 (див. додатки).

$m_{CO_2} = \frac{\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}}{\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2}} = \frac{44 \cdot 0,25}{44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75} = 0,31$;

$m_{O_2} = \frac{\mu_{O_2} \cdot r_{O_2}}{\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2}} = \frac{32 \cdot 0,25}{44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75} = 0,69$.

Отже, $c_{pm}|_0^{1000} = 1,1225 \cdot 0,31 + 1,0350 \cdot 0,69 = 1,0621$ кДж/(кг·К);

$c_{pm}|_0^{500} = 1,0128 \cdot 0,31 + 0,9793 \cdot 0,69 = 0,9897$ кДж/(кг·К);

$c_{pm}|_{500}^{1000} = \frac{1,0621 \cdot 1000 - 0,9897 \cdot 500}{1000 - 500} = 1,1345$ кДж/(кг·К).

Кількість теплоти, що витрачається на нагрівання 150 кг суміші $Q = 150 \cdot 1,1345 \cdot (1273 - 773) = 85,1$ МДж.

4.5. Задачі

4.5.1. Обчислити значення масової та об'ємної теплоємностей газоподібної речовини (табл. 4.3) при постійному тиску, вважаючи, що теплоємність не залежить від температури.

4.5.2. Обчислити значення масової теплоємності речовини (табл. 4.3) при постійних величинах об'єму і тиску, допустивши, що $c = \text{const}$.

4.5.3. Встановити значення масової та об'ємної теплоємностей речовини (табл. 4.3) при постійному об'ємі, допустивши, що $c = \text{const}$.

4.5.4. Обчислити середні значення масової та об'ємної теплоємностей речовини (табл. 4.3) при постійному тиску в межах зміни температури від 0 до t_1 , допускаючи, що залежність теплоємності від температури нелінійна.

4.5.5. Знайти середнє значення теплоємності c_{pm} , c'_{pm} речовини (табл. 4.3) у межах зміни температури від t_1 до t_2 , припускаючи, що залежність теплоємності від температури: а) лінійна, б) нелінійна.

4.5.6. Обчислити істинне значення теплоємності речовини (табл. 4.3), температура якої дорівнює t_1 .

4.5.7. Речовина (табл. 4.3), що має постійний об'єм V при тиску p_1 і температурі t_1 нагрівається до температури t_2 . Визначити кількість підведеної до газу теплоти, вважаючи, що теплоємність не залежить від температури.

4.5.8. В ізобарному процесі температура речовини (табл. 4.3) знижується від t_2 до t_1 . Яку кількість теплоти втрачає газ масою M , кг за таких умов: а) теплоємність газу стала; б) теплоємність залежить від температури.

4.5.9. У посудині об'ємом V міститься речовина (табл. 4.3), тиск якої p_1 , температура дорівнює t_1 . Яку кількість теплоти необхідно підвести, щоб температура речовини підвищилася до t_2 ? Який тиск установиться при цьому в посудині? Допускаємо таку залежність теплоємності від температури:

а) $c = const$; б) нелінійна.

Таблиця 4.3

Остання цифра шифру	Речовина	t_1 , °C	t_2 , °C	Передостання цифра шифру	V , м ³	p_1 , МПа	G , кг/год	M , кг
0	O ₂	200	750	0	42	3,0	240	10
1	Повітря	300	1100	1	75	3,5	360	20
2	H ₂	150	650	2	20	1,5	320	30
3	N ₂	210	730	3	47	2,6	400	40
4	Ar	180	600	4	35	0,8	510	50
5	CO	270	850	5	70	1,3	370	60
6	He	320	900	6	60	2,4	450	55
7	CH ₄	260	800	7	50	3,7	550	45
8	CO ₂	290	700	8	55	4,0	600	65
9	SO ₂	400	1000	9	85	1,1	290	35

4.5.10. У регенеративному підігрівачі газової турбіни температура речовини (табл. 4.3) знижується від t_2 до t_1 . Знайти кількість теплоти, яка передається речовині за одиницю часу, якщо її витрата становить G . Допускаємо таку залежність теплоємності від температури: а) нелінійна; б) $c = const$.

4.5.11. Знайти кількість тепла, необхідного для нагрівання V газової суміші (н.у.), що має об'ємний склад: CO₂ = 15 %; O₂ = 6 %; N₂ = 79 %, від $t_1 = 200$ °C до $t_2 = 1200$ °C при сталому тиску. Теплоємність суміші залежить від температури нелінійно.

5. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Викладено короткі теоретичні відомості про загальні положення дослідження процесів ідеального газу; основні закономірності та графічне представлення ізохорного, ізобарного, ізотермічного, адіабатного і політропного процесів.

Мета – сформулювати знання про основні термодинамічні процеси зміни стану ідеального газу.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- користуватися рівняннями стану ідеального газу та першим законом термодинаміки для визначення термічних і калоричних параметрів стану речовини в термодинамічних процесах;
- визначати умови перебігу основних термодинамічних процесів;
- розраховувати зміни калоричних параметрів, теплоти, роботи процесів;
- аналізувати характер перебігу процесів за допомогою p - v і T - s діаграм.

5.1. Короткі теоретичні відомості

Суттєвий практичний інтерес в теорії теплотехніки становлять основні термодинамічні процеси:

- ізохорний, що протікає при сталому об'ємі ($v = \text{const}$);
- ізобарний – при постійному тиску ($p = \text{const}$);
- ізотермічний – при постійній температурі ($T = \text{const}$);
- адіабатний, що протікає без теплообміну з навколишнім середовищем ($q = 0$, $dq = 0$, $pv^k = \text{const}$);
- політропний, що протікає при сталої теплоємності ($c_n = \text{const}$, $pv^n = \text{const}$). Він є узагальнюючим процесом, що охоплює всю сукупність можливих термодинамічних процесів.

Методика дослідження і розрахунків для всіх процесів однакова і складається в наступному:

- виводиться рівняння процесу, яке встановлює зв'язок між початковими і кінцевими параметрами стану;
- визначається зміна калоричних параметрів (Δu , Δh , Δs);
- обчислюються теплота і робота, які приймають участь у даному процесі;
- зображуються графіки процесів в p - v і T - s координатах.

Рівняння процесів, формули для обчислення Δu , Δh , Δs , а також теплоти і роботи в кожному процесі наведені в таблиці 5.1. Зображення процесів розширення і стиску газів в p - v і T - s координатах наведені в таблиці 5.2.

5.2. Методичні рекомендації до розв'язування задач

Вивчаючи цю тему, студент повинен засвоїти поняття ентальпії, ентропії, внутрішньої енергії і запам'ятати, що вони є калоричними параметрами стану

робочого тіла, тобто їхня задана величина визначає конкретний енергетичний стан газу. Необхідно уміти користуватися рівняннями стану ідеального газу та першим законом термодинаміки для визначення термічних і калоричних параметрів стану речовини в термодинамічних процесах. Належить твердо усвідомлювати умови перебігу основних термодинамічних процесів, набути навичок розрахунку зміни калоричних параметрів, теплоти, роботи, а також вміти аналізувати характер перебігу процесів за допомогою p - v і T - s діаграм. Вихідні дані для самостійного розв'язування задач наведені в табл. 5.3.

5.3. Питання для самоконтролю

5.3.1. Що називається термодинамічним процесом?

5.3.2. У чому полягає принципова різниця між поняттями теплоти і роботи?

5.3.3. Що таке робота і як вона обчислюється в загальному вигляді?

5.3.4. Що являє собою теплота і яким чином її обчислюють?

5.3.5. Що розуміють під параметром ентальпії?

5.3.6. Яким чином у технічній термодинаміці визначають термін внутрішньої енергії газу і функцією яких параметрів вона є?

5.3.7. Що являє собою ентальпія і яким чином її обчислюють?

5.3.8. Перелічіть основні термодинамічні процеси ідеального газу.

5.3.9. Як називається термодинамічний процес ідеального газу, в якому вся підведена теплота йде на зміну внутрішньої енергії?

5.3.10. Як називається процес, у якому вся підведена теплота йде на здійснення роботи?

5.3.11. Як називається процес, у якому робота відбувається тільки за рахунок зменшення внутрішньої енергії?

5.3.12. Як називається процес, у якому вся підведена до робочого тіла теплота чисельно дорівнює зміні ентальпії?

5.3.13. У якому процесі зміна ентропії не відбувається?

5.3.14. Яким чином можна довести, що політропний процес є узагальнюючим?

5.3.15. Як можна показати роботу в графічній інтерпретації?

5.3.16. Як можна показати теплоту в графічній інтерпретації?

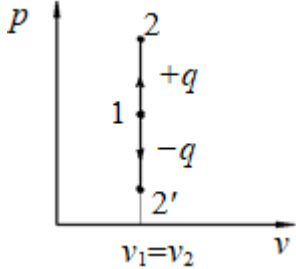
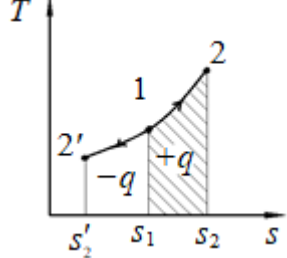
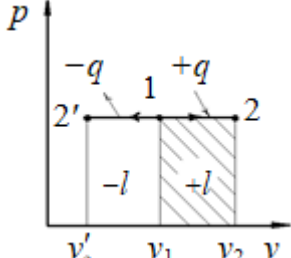
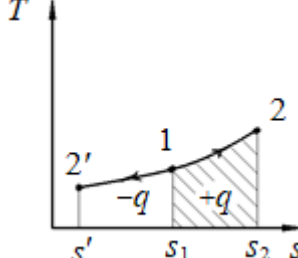
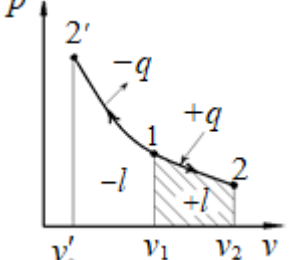
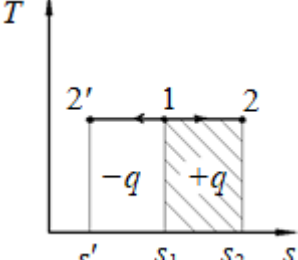
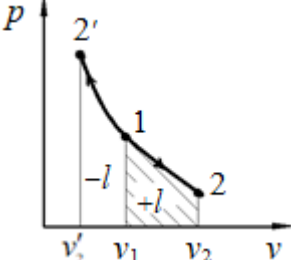
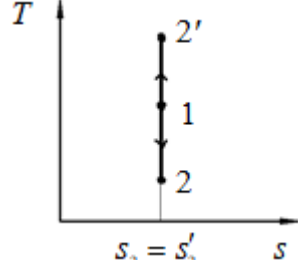
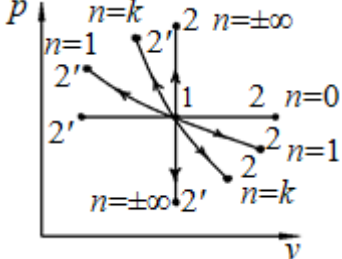
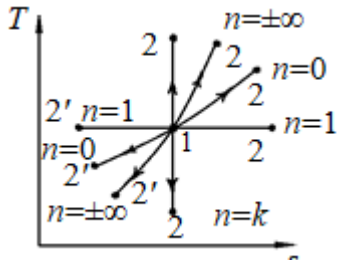
Таблиця 5.1 – Формули розрахунку термодинамічних процесів

Назва процесу	Умови проходження процесу	Взаємозв'язок між параметрами	Питома робота, Дж/кг	Питома теплота, Дж/кг	Зміна питомої внутрішньої енергії, Дж/кг	Зміна питомої ентальпії, Дж/кг	Зміна питомої ентропії, Дж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8
Ізохорний	$v = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$l_{1-2} = 0$	$q_{1-2} = \Delta u$ $q_{1-2} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta u_{1-2} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta h_{1-2} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta s_{1-2} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізобарний	$p = const$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$l_{1-2} = p \cdot (v_2 - v_1)$ $l_{1-2} = R \cdot (T_2 - T_1)$	$q_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$ $q_{1-2} = \Delta h_{1-2}$	$\Delta u_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta h_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta s_{1-2} = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізотермічний	$T = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$	$l_{1-2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$ $l_{1-2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$	$q_{1-2} = l_{1-2}$ $q_{1-2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$\Delta u_{1-2} = 0$	$\Delta h_{1-2} = 0$	$\Delta s_{1-2} = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$

Закінчення табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Адіабатний	$p v^k = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$	$l_{1-2} = \frac{1}{k-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)$ $l_{1-2} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2)$ $l_{1-2} = \frac{R \cdot T_1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$	$q_{1-2} = 0$	$\Delta u_{1-2} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta h_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta s_{1-2} = 0$
Політропний	$p v^n = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}$	$l_{1-2} = \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)$ $l_{1-2} = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2)$ $l_{1-2} = \frac{R \cdot T_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$	$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + l_{1-2}$ $q_{1-2} = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta u_{1-2} = c_v \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta h_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta s_{1-2} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$

Таблиця 5.2 – Графічне зображення термодинамічних процесів

Назва процесу	Зображення процесу в $p-v$ координатах	Зображення процесу $T-s$ координатах
Ізохорний		
Ізобарний		
Ізотермічний		
Адіабатний		
Політропний		

5.4. Приклади розв'язування задач

Ізохорний процес

5.4.1. В закритій посудині знаходиться газ при розрідженні $p_{1\text{вак}} = 7500$ Па і температурі 300 К. Показ барометра $B = 98750$ Па. До якої температури потрібно охолодити газ, щоб розрідження стало $p_{2\text{вак}} = 25500$ Па?

Розв'язання

В ізохорному процесі має місце така залежність між початковими і кінцевими параметрами (див. табл. 5.1)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

де $p_1 = B - p_{1\text{вак}} = 98750 - 7500 = 91250$ Па;

$p_2 = B - p_{2\text{вак}} = 98750 - 25000 = 73750$ Па.

Отже, $T_2 = T_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} = 300 \cdot \frac{73750}{91250} = 242$ К.

5.4.2. В балоні місткістю $V = 0,9 \text{ м}^3$ міститься повітря при тиску $p_1 = 0,5$ МПа і температурі $T_1 = 293$ К. Внаслідок охолодження балона, повітря яке знаходиться в ньому, втрачає $Q = 250$ кДж.

Визначити, який тиск і температура встановляться в балоні після його охолодження, вважаючи теплоємність повітря сталою.

Розв'язання

Скориставшись термічним рівнянням стану, знайдемо масу повітря в балоні

$$M = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{287 \cdot 293} = 5,4 \text{ кг},$$

де $R = 287$ Дж/(кг·К) – стала повітря.

Кількість тепла, відведеного від повітря в ізохорному процесі визначається за рівнянням

$$Q_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1),$$

звідки $T_2 = \frac{Q_{1-2}}{M \cdot c_v} + T_1 = \frac{-250}{5,4 \cdot 0,717} + 293 = 228$ К.

Значення c_v одержано за формулою

$$c_v = \frac{\mu \cdot c_v}{\mu} = \frac{20,8}{29} = 0,717 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Із співвідношення параметрів в ізохорному процесі маємо

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 0,5 \cdot \frac{228}{293} = 0,389 \text{ МПа}.$$

Таблиця 5.3

Остання цифра шифру	Газ	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$p_3, \text{МПа}$	$V, \text{мм рт. ст.}$	λ	Передостання цифра шифру	$V_1, \text{м}^3$	$V_2, \text{м}^3$	ε	d	$M, \text{кг}$	$Q, \text{кДж}$	$D, \text{мм}$	n
0	Повітря	30	120	0,5	1,6	0,11	750	2,3	0	1,5	3,4	5,0	2,5	10	800	160	1,31
1	CO ₂	25	80	0,2	8,5	0,31	755	1,8	1	2,0	4,9	3,8	3,0	4,5	837	150	1,51
2	CH ₄	29	150	0,3	3,5	0,40	735	4,0	2	1,3	3,8	4,0	1,9	5,0	350	145	1,43
3	H ₂	23	120	0,1	2,4	0,35	740	3,5	3	1,2	2,7	4,5	3,2	6,0	200	90	1,12
4	N ₂	30	180	0,8	1,9	0,30	730	3,0	4	0,8	2,9	4,2	2,8	3,0	400	112	1,25
5	H ₂	20	75	0,4	2,1	0,55	745	2,8	5	2,1	4,8	3,8	3,1	4,2	430	85	1,35
6	CO	18	90	0,6	3,5	0,15	760	4,5	6	1,8	4,3	4,3	2,9	2,9	580	175	1,17
7	Ar	28	140	0,11	1,3	0,12	735	3,3	7	2,4	4,5	4,5	3,5	3,5	630	105	1,28
8	O ₂	32	85	0,22	3,5	0,20	750	2,9	8	2,7	6,8	3,5	2,5	4,3	710	95	1,18
9	SO ₂	19	68	0,7	3,7	0,25	760	3,2	9	2,3	6,0	3,9	2,4	5,5	520	123	1,6

5.4.3. До якої температури потрібно охолодити газ H_2 об'ємом $V = 6,8 \text{ м}^3$, що має початковий тиск $p_1 = 2,1 \text{ МПа}$ і температуру $t_1 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, щоб тиск при сталому об'ємі знизився до $p_2 = 0,9 \text{ МПа}$. Яку кількість теплоти потрібно для цього відвести? Допустити, що теплоємність газу стала. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Кінцеву температуру газу визначаємо з рівняння ізохори

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ звідки } T_2 = \frac{p_2 \cdot T_1}{p_1} = \frac{0,9 \cdot (75 + 273)}{2,1} = 149 \text{ К.}$$

Кількість відведеної теплоти знаходимо з рівняння

$$Q_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1),$$

де M – маса газу, кг.

Скориставшись рівнянням стану газу, визначаємо

$$M = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 6,8}{4124 \cdot (75 + 273)} = 9,9 \text{ кг,}$$

де $R = 4157 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома газова стала газу H_2 ; c_v – масова ізохорна теплоємність газу H_2 , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{2} = 10,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізохорна теплоємність двохатомних газів; $\mu = 2 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмоль газу H_2 .

$$Q_{1-2} = 9,9 \cdot 10,4 \cdot (149 - 348) = - 20,5 \text{ МДж.}$$

Будуємо графіки ізохорного процесу.

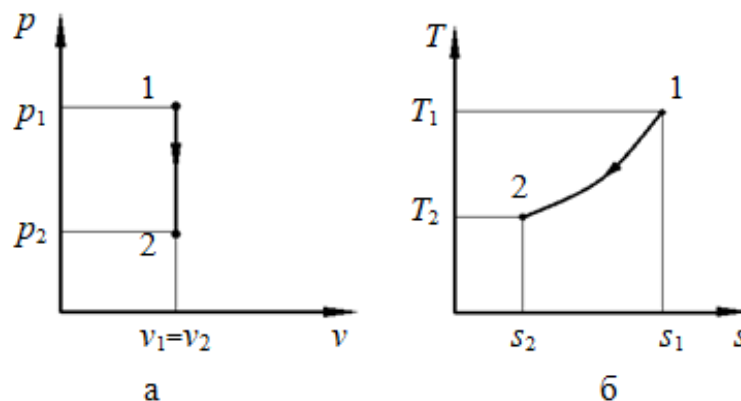


Рисунок 5.1 – Графіки ізохорного процесу:
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.4. Посудина об'ємом $V = 1,5 \text{ м}^3$ містить газ CO_2 при тиску $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити кількість тепла, яку необхідно витратити для підвищення тиску газу в посудині до $p_2 = 0,85 \text{ МПа}$. Допустити, що залежність

теплоємності від температури нелінійна. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Визначаємо кількість теплоти, яку треба витратити для підвищення тиску газу, скориставшись формулою:

$$Q_{1-2} = M \cdot c_{vm} \cdot (T_2 - T_1),$$

де T_2 – кінцева температура газу, К.

T_2 знаходимо з рівняння ізохори

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}, \text{ звідки } T_2 = \frac{p_2 \cdot T_1}{p_1} = \frac{0,85 \cdot (25 + 273)}{0,2} = 1266 \text{ К.}$$

M – маса газу, що міститься у посудині, кг.

Відповідно до рівняння стану ідеального газу

$$M = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{189 \cdot (75 + 273)} = 5,53 \text{ кг,}$$

де $R = 189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома газова стала для CO_2 ; c_{vm} – середня ізохорна теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

При нелінійній залежності теплоємності від температури c_{vm} визначаємо за формулою

$$c_{vm} = c_{vm}|_{T_1}^{T_2} = \frac{c_{vm}|_{T_0}^{T_2} \cdot (T_2 - T_0) - c_{vm}|_{T_0}^{T_1} \cdot (T_1 - T_0)}{T_2 - T_1},$$

де $c_{vm}|_{T_0}^{T_2} = c_{vm}|_{273}^{1266} = 0,933 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; (див. додатки, табл. 8)

$$c_{vm}|_{T_0}^{T_1} = c_{vm}|_{273}^{298} = 0,6271 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_{vm} = \frac{0,933 \cdot (1266 - 273) - 0,6271 \cdot (298 - 273)}{1266 - 298} = 0,94 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$Q = 5,53 \cdot 0,94 \cdot (1266 - 298) = 5032 \text{ кДж} = 5,03 \text{ МДж.}$$

Будуємо графіки ізохорного процесу.

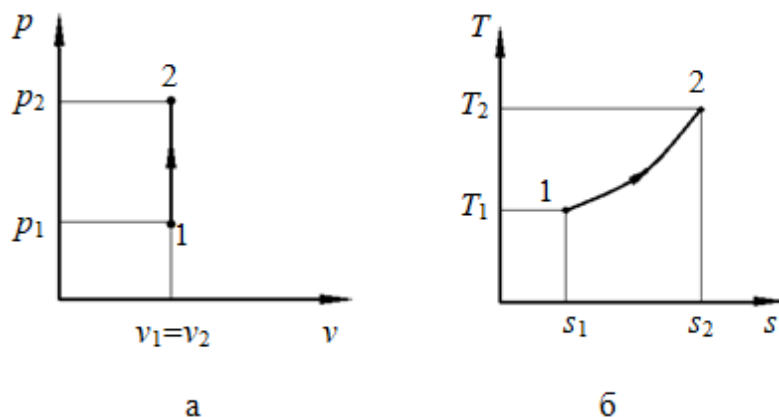


Рисунок 5.2 – Графіки ізохорного процесу
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.5. У закритій посудині об'ємом $V = 6,8 \text{ м}^3$ утримується газ N_2 , тиск якого $p_1 = 1,9 \text{ МПа}$, а температура $t_1 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити величину кінцевого тиску, зміну калоричних параметрів, кількість відведеної теплоти за умови, що температура газу знизилась до $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Для розв'язання цієї задачі скористуємося рівнянням стану ідеального газу та рівнянням ізохори.

Визначаємо масу газу у закритій посудині з рівняння стану

$$M = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{1,9 \cdot 10^6 \cdot 6,8}{297 \cdot 453} = 96 \text{ кг},$$

де $R = 297 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома газова стала для N_2 ;

$$T_1 = t_1 + 273 = 180 + 273 = 453 \text{ К}.$$

Кінцевий тиск p_2 знаходимо з рівняння ізохори

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ звідки } p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{1,9 \cdot 303}{453} = 1,27 \text{ МПа},$$

$$\text{де } T_2 = t_2 + 273 = 30 + 273 = 303 \text{ К}.$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів:

зміна внутрішньої енергії газу

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 96 \cdot 0,74 \cdot (303 - 453) = -10,6 \text{ МДж},$$

де c_v – масова ізохорна теплоємність,

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{28} = 0,74 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізохорна теплоємність двохатомних газів;

$\mu = 28 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмоль газу N_2 .

Зміна ентальпії газу

$$\Delta H = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 96 \cdot 1,04 \cdot (303 - 453) = -14,9 \text{ МДж},$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$,

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{28} = 1,04 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних газів.

Зміна ентропії газу

$$\Delta S = M \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 96 \cdot 0,74 \cdot \ln \frac{303}{453} = -28,5 \text{ кДж}/\text{К}.$$

Кількість відведеної теплоти

$$Q = \Delta U = -10,6 \text{ МДж}.$$

5.4.6. Посудина місткістю $V = 200 \text{ м}^3$ містить кисень при надлишковому тиску $p_n = 900 \text{ кПа}$ і температурі 320 К . Визначити кінцеву температуру, зміну ентропії і кількість теплоти, яке необхідно, підвести до газу, щоб підвищити абсолютний тиск до $p_2 = 2 \text{ МПа}$. Атмосферний тиск $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$ Вважати,

що теплоємність залежить від температури лінійно. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Абсолютний тиск p_1 визначаємо за рівнянням (1.3)

$$p_1 = p_n + B = 900 \cdot 10^3 + 750 \cdot 133 = 1000 \text{ кПа.}$$

Масу кисню в посудині визначаємо за рівнянням Клапейрона

$$M = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{1000 \cdot 10^3 \cdot 200}{259,8 \cdot 320} = 2406 \text{ кг,}$$

де $R = 259,8$ Дж/(кг·К) – питома газова стала кисню.

Кінцеву температуру визначаємо із співвідношення параметрів в ізохорному процесі

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} = 320 \cdot \frac{2000}{1000} = 640 \text{ К.}$$

Кількість теплоти, наданої на зміну внутрішньої енергії кисню, знайдемо по формулі

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} = M \cdot c_{vm} \cdot (T_2 - T_1).$$

Значення c_{vm} визначимо з виразу (4.7) і даних табл. 11 (див. додатки).

$$c_{vm}|_{t_1}^{t_2} = 0,6594 + 0,0001065 \cdot (t_1 + t_2) = 0,6594 + 0,0001065 \cdot (47 + 367) = 0,703 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Отже,

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} = 2406 \cdot 0,703 \cdot (640 - 320) = 541,3 \text{ МДж.}$$

Зміну ентропії визначаємо за рівнянням

$$\Delta S = M \cdot c_{vm} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 2406 \cdot 0,703 \cdot \ln \frac{640}{320} = 1172,4 \text{ кДж/К.}$$

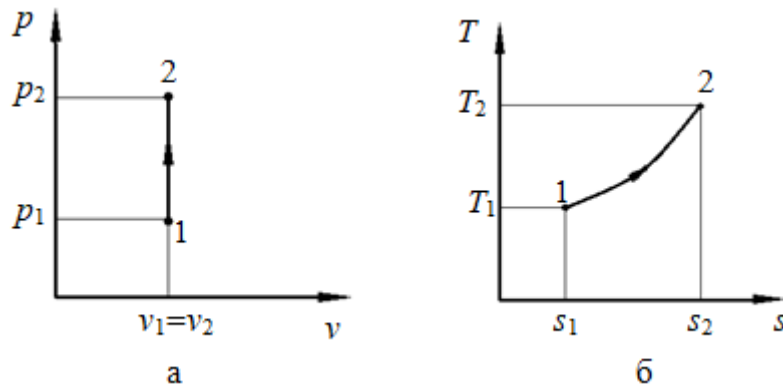


Рисунок 5.3 – Графіки ізохорного процесу:
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.7. В закритій посудині місткістю 250 л міститься повітря при тиску $p_1 = 0,8$ МПа і температурі $T_1 = 303$ К.

Визначити кількість тепла, яке необхідно надати повітрю, щоб підвищити його тиск до 1,6 МПа. Прийняти залежність теплоємності від температури нелінійною.

Розв'язання

Із співвідношення параметрів ізохорного процесу маємо

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{p_2}{p_1} = 303 \cdot \frac{1,6}{0,8} = 606 \text{ К.}$$

Знайдемо теплоту

$$Q_{1-2} = M \cdot c_{vm} \cdot (T_2 - T_1),$$

де M – маса повітря в резервуарі, яка визначається за рівнянням

$$M = \frac{p_1 \cdot V}{R \cdot T_1} = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot 303} = 2,3 \text{ кг;}$$

$c_{vm} = c_{vm}|_{T_1}^{T_2}$ – середня масова ізохорна теплоємність, яка визначається за формулою

$$c_{vm}|_{T_1}^{T_2} = \frac{c_{vm}|_{T_0}^{T_2} \cdot (T_2 - T_0) - c_{vm}|_{T_0}^{T_1} \cdot (T_1 - T_0)}{T_2 - T_1}.$$

Скориставшись табл. 10 (див. додатки) маємо

$$c_{vm}|_{T_1}^{T_2} = c_{vm}|_{273}^{606} = 0,7628 \text{ кДж/(кг·К)}, \quad c_{vm}|_{T_1}^{T_2} = c_{vm}|_{273}^{303} = 0,7321 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$\text{отже } c_{vm}|_{T_1}^{T_2} = \frac{0,7628 \cdot (606 - 273) - 0,7321 \cdot (303 - 273)}{T_2 - T_1} = 0,766 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Надане тепло повітрю

$$Q_{1-2} = 2,3 \cdot 0,766 \cdot (606 - 303) = 528,5 \text{ кДж.}$$

Ізобарний процес

5.4.8. Азот масою $M = 10 \text{ кг}$ ($\mu_{N_2} = 28 \text{ кг/кмоль}$) розширюється по ізобарі при абсолютному тиску 0,5 МПа, так, що температура його зростає від $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. до $t_2 = 227 \text{ }^\circ\text{C}$. Знайти кінцевий об'єм азоту, виконану роботу, підведено тепло, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії. Вважати, що теплоємність не залежить від температури. Зобразити процес в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Визначаємо початковий об'єм газу з термічного рівняння стану (1.15)

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{10 \cdot 297 \cdot (273 + 100)}{0,5 \cdot 10^6} = 2,2 \text{ м}^3,$$

де $R = 297 \text{ Дж/(кг·К)}$ – газова стала азоту.

Кінцевий об'єм азоту визначаємо з рівняння ізобарного процесу:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ звідки } V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{2,2 \cdot (273 + 227)}{373} = 2,95 \text{ м}^3.$$

Обчислимо роботу розширення газу

$$L_{1-2} = p \cdot (V_2 - V_1) = 0,5 \cdot 10^3 \cdot (2,95 - 2,2) = 375 \text{ кДж.}$$

Кількість тепла підведеного до азоту

$$Q_{1-2} = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 1,04 \cdot (500 - 373) = 1321 \text{ кДж,}$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність N_2 .

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29}{28} = 1,04 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К).}$$

Зміну внутрішньої енергії визначаємо з першого закону термодинаміки

$$\Delta U_{1-2} = Q_{1-2} - L_{1-2} = 1321 - 375 = 946 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії газу в ізобарному процесі

$$\Delta H_{1-2} = Q_{1-2} = 1321 \text{ кДж.}$$

Зміна ентропії газу

$$\Delta S_{1-2} = M \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 10 \cdot 1,04 \cdot \ln \frac{500}{373} = 3,05 \text{ кДж/К.}$$

Графічне зображення процесу і розширення газу надане на рис. 5.5.

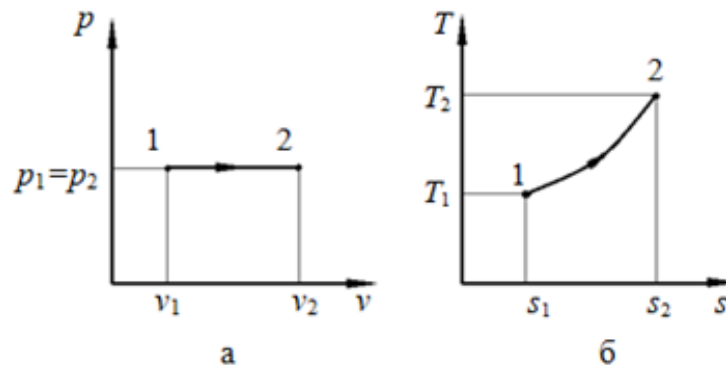


Рисунок 5.4 – Графіки ізобарного процесу
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.9. Повітря ($\mu = 29$ кг/кмоль) розширюється в процесі при $p = 0,5$ МПа = $const$ так, що його об'єм збільшується від $V_1 = 0,35$ м³ до $V_2 = 1,8$ м³. Температура в кінці розширення дорівнює 1500 °С. Визначити температуру повітря на початку процесу розширення, кількість теплоти, роботу, яку здійснює повітря, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії. Вважаємо, що $c = const$.

Розв'язання

Температуру повітря визначаємо із рівняння ізобари (див. табл. 5.1.)

$$T_1 = \frac{V_1 \cdot T_2}{V_2} = \frac{0,35 \cdot 1773}{1,8} = 345 \text{ К.}$$

Підведена кількість теплоти:

$$Q_{1-2} = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1),$$

де M – маса повітря визначається з рівняння

$$M = \frac{p \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,35}{286,7 \cdot 345} = 1,77 \text{ кг};$$

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

c_p – масова ізобарна теплоємність повітря;

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{29} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отже,

$$Q_{1-2} = 1,77 \cdot 1,0 \cdot (1773 - 345) = 2540 \text{ кДж.}$$

Здійснена робота

$$L_{1-2} = p \cdot (V_2 - V_1) = 0,5 \cdot 10^3 \cdot (1,8 - 0,35) = 725 \text{ кДж.}$$

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 1,77 \cdot 0,713 \cdot (1773 - 345) = 1815 \text{ кДж,}$$

$$c_v = c_p - R = 1,0 - 0,287 = 0,713 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Зміна ентальпії

$$\Delta H_{1-2} = Q_{1-2} = 2540 \text{ кДж.}$$

Зміна ентропії

$$\Delta S_{1-2} = M \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 1,77 \cdot 1,0 \cdot \ln \frac{1773}{345} = 2,9 \text{ кДж}/\text{К}.$$

5.4.10. В циліндрі двигуна об'ємом $V_1 = 700$ л знаходиться газ CO_2 ($\mu_{\text{CO}_2} = 44$ кг/кмоль) при надлишковому тиску $p_n = 4,0$ МПа і температурі $t_1 = 2000$ °С. Атмосферний тиск $B = 100$ кПа. От газу відводиться кількість теплоти при сталому тиску до температури $t_2 = 200$ °С. Визначити масу газу, кінцевий об'єм, зміну внутрішньої енергії, ентропії, кількість відведеної теплоти і роботу стиску здійснену над газом. Вважати, що теплоємність залежить від температури лінійно. Зобразити процес в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Абсолютний тиск визначаємо за рівнянням (1.3)

$$p_1 = p_n + B = 4000 + 100 = 4,1 \text{ МПа.}$$

Масу газу знаходимо з рівняння Клапейрона

$$M = \frac{p \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{4,1 \cdot 10^6 \cdot 700 \cdot 10^{-3}}{189 \cdot (2000 + 273)} = 6,7 \text{ кг,}$$

де $R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{44} = 189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала CO_2 .

Кінцевий об'єм визначаємо із рівняння ізобари (див. табл. 5.1)

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{700 \cdot 10^3 \cdot 473}{2273} = 0,146 \text{ м}^3 = 146 \text{ л.}$$

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot c_{vm} \cdot (t_2 - t_1),$$

де $c_{vm} = c_{vm}|_{t_1}^{t_2}$ – середня масова ізохорна теплоємність визначаємо з рівняння (4.7) і даних табл. 11 (див. додатки)

$$c_{vm}|_{t_1}^{t_2} = 0,6837 + 0,0002406 \cdot (t_1 + t_2) = 0,6837 + 0,0002406(2000 + 200) = 1,21 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

Отже,

$$\Delta U_{1-2} = 6,7 \cdot 1,21 \cdot (200 - 2000) = -14,6 \text{ МДж.}$$

Кількість відведеної теплоти

$$Q_{1-2} = \Delta H_{1-2} = M \cdot c_{pm} \cdot (t_2 - t_1),$$

$$\text{де } c_{pm} = c_{pm}|_{t_1}^{t_2} = 0,8725 + 0,0002406(t_1 + t_2) = 0,8725 + 0,0002406(2000 + 200) = 1,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Отже,

$$Q_{1-2} = 6,7 \cdot 1,4 \cdot (200 - 2000) = -16,9 \text{ МДж.}$$

Робота, яка витрачена на стиск газу

$$L_{1-2} = p \cdot (V_2 - V_1) = 4,0 \cdot (0,146 - 0,7) = -2,22 \text{ МДж.}$$

Зміна ентропії

$$\Delta S_{1-2} = M \cdot c_{pm} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 6,7 \cdot 1,4 \cdot \ln \frac{473}{2273} = -14,7 \text{ кДж}/\text{К.}$$

Будуємо графіки ізобарного процесу в $p-v$ і $T-s$ координатах.

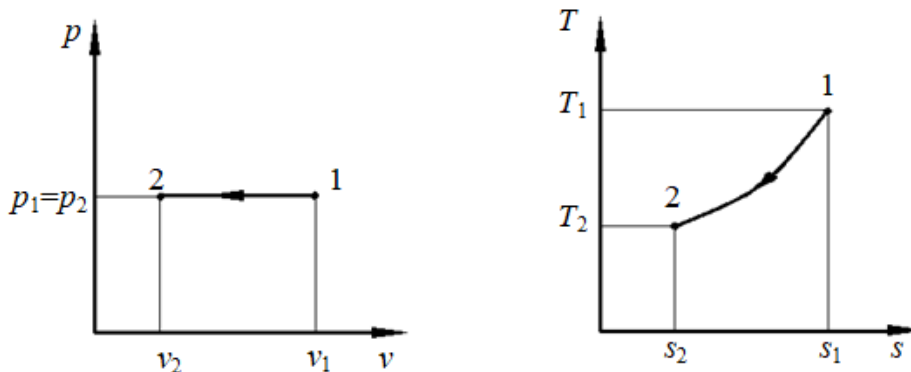


Рисунок 5.5 – Графіки ізобарного процесу
а – в $p-v$ координатах; б – в $T-s$ координатах

5.4.11. Теплота продуктів згорання палива на виході з котельного агрегату передається в повітрянагрівнику повітрю, температура якого збільшується від 20°C до $t_2 = 400^\circ\text{C}$ при сталому тиску $p = 100 \text{ кПа}$. Визначити об'єм нагрітого повітря і зміну його внутрішньої енергії теплоти за 1 годину, а також кількість підведеної теплоти за одну годину і також масову витрату (кг/год) продуктів згорання, якщо об'ємна витрата повітря віднесена до н.у., складає $V_{\text{пн}} = 15000 \text{ м}^3/\text{год}$. Зміна температури продуктів згорання в повітрянагрівнику дорівнює $\Delta t_r = 350^\circ\text{C}$, а середня масова ізобарна теплоємність продуктів згорання дорівнює $c_{pmr} = 1,16 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Розв'язання

Масову витрату повітря визначимо з рівняння Клапейрона

$$M_{\text{п}} = \frac{p_{\text{н}} \cdot V_{\text{пн}}}{R_{\text{п}} \cdot T_{\text{н}}} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 15000}{286,7 \cdot 273} = 19414 \text{ кг/год},$$

де $R_{\text{п}} = \frac{8314}{\mu_{\text{п}}} = \frac{8314}{29} = 286,7 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ – газова стала повітря.

Об'ємна витрата нагрітого повітря у повітряонагрівнику

$$V_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}} \cdot R_{\text{п}} \cdot T_2}{p} = \frac{19414 \cdot 286,7 \cdot (273 + 400)}{100 \cdot 10^3} = 37459 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Зміна внутрішньої енергії повітря

$$\Delta U_{\text{п}} = M_{\text{п}} \cdot c_{\text{вмп}} \cdot (t_2 - t_1),$$

де $c_{\text{вмп}} = c_{\text{вмп}}|_{t_1}^{t_2}$ – середня масова ізохорна теплоємність повітря, яку визначаємо за формулою (4.10) і даних табл. 10 (див. додатки)

$$c_{\text{вмп}}|_{20}^{400} = \frac{c_{\text{вмп}}|_0^{400} \cdot 400 - c_{\text{вмп}}|_0^{20} \cdot 20}{400 - 20} = \frac{0,7415 \cdot 400 - 0,717 \cdot 20}{380} = 0,742 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Отже,

$$\Delta U_{\text{п}} = 19414 \cdot 0,742 \cdot (400 - 20) = 5,48 \cdot 10^6 \text{ кДж/год}.$$

Кількість теплоти, що підведена до повітря

$$Q = M_{\text{п}} \cdot c_{\text{рмп}} \cdot (t_2 - t_1),$$

де $c_{\text{рмп}} = c_{\text{рмп}}|_{t_1}^{t_2}$ – середня масова ізобарна теплоємність повітря

$$c_{\text{рмп}}|_{20}^{400} = \frac{c_{\text{рмп}}|_0^{400} \cdot 400 - c_{\text{рмп}}|_0^{20} \cdot 20}{400 - 20} = \frac{1,0283 \cdot 400 - 1,0041 \cdot 20}{380} = 1,03 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Отже,

$$Q = 19414 \cdot 1,03 \cdot (400 - 20) = 7,6 \cdot 10^6 \text{ кДж/год}.$$

Витрата продуктів згорання визначається з рівняння теплового балансу [4]

$$Q = M_{\text{п}} \cdot c_{\text{рмп}} \cdot \Delta t_{\text{п}} = M_{\text{г}} \cdot c_{\text{рмг}} \cdot \Delta t_{\text{г}},$$

звідки

$$M_{\text{г}} = \frac{Q}{c_{\text{рмг}} \cdot \Delta t_{\text{г}}} = \frac{7,6 \cdot 10^6}{1,16 \cdot 350} = 18708 \text{ кг/год}.$$

5.4.12. Газ N_2 об'ємом $V_1 = 2,0 \text{ м}^3$, що міститься в циліндрі з навантаженим поршнем, який рухається вільно, при сталому тиску підводиться тепло $Q = 837 \text{ кДж}$. Об'єм газу при цьому збільшується до $V_2 = 4,9 \text{ м}^3$. Початкова температура газу дорівнює $t_1 = 30 \text{ °C}$. Яка температура встановлюється в циліндрі і чому дорівнює робота розширення? визначити зміну калоричних параметрів. Допустити, що теплоємність газу не залежить від температури.

Розв'язання

Визначаємо кінцеву температуру в циліндрі, скориставшись рівнянням ізобари

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2}, \text{ звідки } T_2 = \frac{V_2 \cdot T_1}{V_1} = \frac{4,9 \cdot (273 + 30)}{2} = 742 \text{ К.}$$

Роботу розширення знаходимо з рівняння

$$L = M \cdot R \cdot (T_2 - T_1),$$

де M – маса газу, кг

$$M = \frac{Q}{c_p \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{837}{1,04 \cdot (742 - 303)} = 1,84 \text{ кг};$$

c_p – масова ізобарна теплоємність N_2 .

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{28} = 1,04 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$\mu = 28 \text{ кг/кмоль}$ – маса 1 кмоль газу;

$\mu c_p = 29,1 \text{ кДж/(кмоль·К)}$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних

газів;

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ кДж/(кг·К)} – \text{питома газова стала } N_2.$$

$$L = 1,84 \cdot 297 \cdot 10^3 \cdot (742 - 303) = 240 \text{ кДж.}$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів:

зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1),$$

де c_v – масова ізохорна теплоємність, кДж/(кг·К).

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{28} = 0,74 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$\mu c_v = 20,8 \text{ кДж/(кмоль·К)}$ – мольна ізохорна теплоємність двохатомних

газів.

$$\Delta U = 1,84 \cdot 0,74 \cdot (742 - 303) = 600 \text{ кДж};$$

зміна ентальпії газу

$$\Delta H = Q = 837 \text{ кДж};$$

зміна ентропії газу

$$\Delta S = M \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 1,84 \cdot 1,04 \cdot \ln \frac{742}{303} = 1,71 \text{ кДж/К.}$$

5.4.13. Повітря, що міститься в циліндрі об'ємом $V_1 = 0,15 \text{ м}^3$ і діаметром $D = 360 \text{ мм}$, має початкову температуру $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, підігрівається при сталому тиску $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ до температури $t_2 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити зміну калоричних параметрів, обчислити роботу розширення, переміщення поршня та кількість затраченого при цьому тепла, вважаючи, що залежність теплоємності від температури лінійна.

Розв'язання

Для визначення переміщення (ходу) поршня необхідно знайти кінцевий об'єм V_2 , який займає повітря, скориставшись рівнянням стану

$$V_2 = \frac{M \cdot R \cdot T_2}{p_2},$$

де M – маса повітря, кг

$$p_2 = p_1 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – питома газова стала для повітря.

$T_2 = t_2 + 273 = 120 + 273 = 393 \text{ К}$ – кінцева температура повітря.

Масу повітря знаходимо з рівняння початкового його стану

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,15}{287 \cdot (273 + 30)} = 0,86 \text{ кг.}$$

$$\text{Тоді } V_2 = \frac{0,86 \cdot 287 \cdot 393}{0,5 \cdot 10^6} = 0,194 \text{ м}^3.$$

Визначаємо хід поршня за формулою

$$h = \frac{4 \cdot (V_2 - V_1)}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot (0,194 - 0,15)}{3,14 \cdot 0,360^2} = 0,432 \text{ м.}$$

Зміна калоричних параметрів:

зміна внутрішньої енергії повітря

$$\Delta U = M \cdot c_{vm} \cdot (T_2 - T_1),$$

де c_{vm} – середня масова ізохорна теплоємність.

$$c_{vm} = 0,7280 + 0,00008382(t_1 + t_2) = 0,7280 + 0,00008382(30 + 120) = 0,7405 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)} \text{ [кДж/(кг} \cdot \text{К)],}$$

$$\Delta U = 0,86 \cdot 0,7405 \cdot (393 - 303) = 57,3 \text{ кДж;}$$

зміна ентальпії повітря

$$\Delta H = M \cdot c_{pm} \cdot (T_2 - T_1),$$

де c_{pm} – середня масова ізобарна теплоємність.

$$c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382(t_1 + t_2) = 1,0258 + 0,00008382(30 + 120) = 1,0383 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)} \text{ [кДж/(кг} \cdot \text{К)],}$$

$$\Delta H = 0,86 \cdot 1,0383 \cdot (393 - 303) = 80,4 \text{ кДж;}$$

зміна ентропії повітря

$$\Delta S = M \cdot c_{pm} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,86 \cdot 1,0383 \cdot \ln \frac{393}{303} = 0,23 \text{ кДж/К.}$$

Тепло, яке приймає участь в процесі

$$Q = \Delta H = 80,4 \text{ кДж.}$$

Робота повітря в процесі

$$L = Q - \Delta U = 80,4 - 57,3 = 23,1 \text{ кДж.}$$

5.4.14. Одним із видів втрат в ДВЗ є втрати тепла з випускними газами. Розрахувати втрату тепла з випускними газами при $p = const$, якщо склад газової суміші такий: $\text{CO}_2 = 25\%$, $\text{O}_2 = 10\%$, $\text{N}_2 = 60\%$ і $\text{H}_2\text{O} = 5\%$. Температура випускних газів 400 °C , температура навколишнього середовища 20 °C . Витрата

випускних газів $M = 20$ кг/год. Вважати, що теплоємність залежить від температури нелінійно.

Розв'язання

Кількість теплоти в ізобарному процесі визначається за формулою

$$Q = M \cdot c_{pm}^c \cdot (t_2 - t_1),$$

де $c_{pm}^c = c_{pm}^c \Big|_{t_1}^{t_2}$ – середня масова ізобарна теплоємність газової суміші в інтервалі температур $t_2 - t_1$ визначається за формулою (4.11).

$$c_{pm}^c \Big|_{t_1}^{t_2} = \sum_1^n c_{pm_k}^c \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot m_k,$$

де $c_{m_k}^c \Big|_{t_1}^{t_2}$ – середня масова ізобарна теплоємність кожного компонента суміші визначається за формулою (4.10) і даними табл. 4, 5, 8 (див. додатки); m_k – масова доля кожного компонента.

$$\begin{aligned} c_{pm}^c \Big|_{20}^{400} &= c_{pmCO_2} \Big|_{20}^{400} \cdot m_{CO_2} + c_{pmO_2} \Big|_{20}^{400} \cdot m_{O_2} + c_{pmN_2} \Big|_{20}^{400} \cdot m_{N_2} + c_{pmH_2O} \Big|_{20}^{400} \cdot m_{H_2O} = \\ &= 1,03 \cdot 0,25 + 0,9676 \cdot 0,1 + 1,0576 \cdot 0,6 + 1,9522 \cdot 0,05 = 1,0865 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}). \end{aligned}$$

Отже, втрата тепла з випускними газами в ДВЗ для заданих умов буде дорівнювати

$$Q = 20 \cdot 1,0865 \cdot (20 - 400) = -8257,4 \text{ кДж}/\text{год}.$$

5.4.15. Газ СО масою $M = 10$ кг, початковий тиск якого дорівнює $p_1 = 0,6$ МПа, а температура $t_1 = 18$ °С, нагрівається ізохорно, унаслідок чого його тиск підвищується у $\lambda = 2,5$ разів. Після цього газ ізобарно охолоджується до початкової температури. Визначити відсутні параметри стану газу на початку і в кінці кожного процесу, зміну калоричних параметрів, обчислити роботу і кількість тепла. Зобразити графіки процесів в p - v і T - s координатах. Допустити, що теплоємність газу стала.

Розв'язання

Визначаємо відсутні початкові і кінцеві параметри стану газу в кожному процесі

Ізохорний 1- 2 процес нагрівання газу

$$\text{Точка 1: } p_1 = 0,6 \text{ МПа; } t_1 = 18 \text{ } ^\circ\text{C; } T_1 = t_1 + 273 = 18 + 273 = 291 \text{ К}.$$

З рівняння стану знаходимо об'єм V_1

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{10 \cdot 296,8 \cdot 291}{0,6 \cdot 10^6} = 1,43 \text{ м}^3,$$

де $R = 296,8$ Дж/(кг·К) – газова стала СО.

Питомий об'єм газу

$$v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{1,43}{10} = 0,143 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

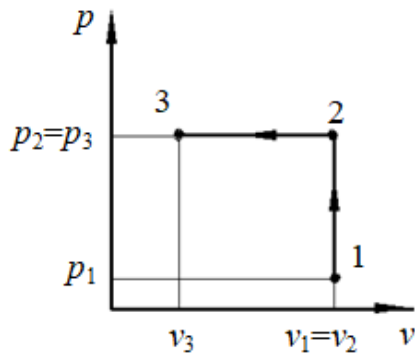


Рисунок 5.6 – Ізохорний 1-2 і ізобарний 2-3 процеси в $p-v$ координатах

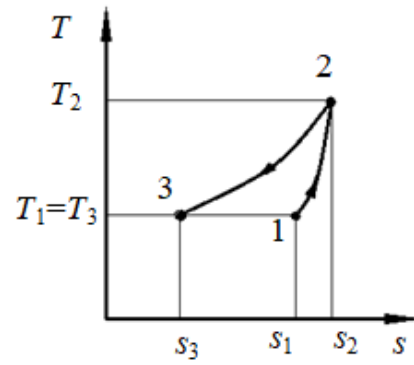


Рисунок 5.7 – Ізохорний 1-2 і ізобарний 2-3 процеси в $T-s$ координатах

Точка 2: користуючись рівнянням ізохори, визначаємо кінцеву температуру газу

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} = \lambda; T_2 = \lambda \cdot T_1 = 2,5 \cdot 291 = 728 \text{ К.}$$

$$\text{Кінцевий тиск } p_2 = \lambda \cdot p_1 = 2,5 \cdot 0,6 = 1,5 \text{ МПа.}$$

$$\text{Кінцевий питомий об'єм } v_2 = v_1 = 0,143 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Ізобарний процес 2-3

$$\text{Точка 3: } p_3 = p_2 = 1,5 \text{ МПа; } T_3 = T_1 = 291 \text{ К.}$$

Питомий об'єм газу знаходимо з рівняння ізобари

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}; v_3 = v_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 0,143 \cdot \frac{291}{728} = 0,057 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів, роботу і кількість теплоти у кожному процесі.

Ізохорний процес 1-2:

зміна внутрішньої енергії газу

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 0,743 \cdot (728 - 291) = 3247 \text{ кДж,}$$

$$\text{де } c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{28} = 0,743 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ – масова ізохорна теплоємність CO;}$$

$$\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) \text{ – мольна ізохорна теплоємність;}$$

$$\mu = 28 \text{ кг}/\text{кмоль} \text{ – маса 1 кмоль газу CO;}$$

зміна ентальпії повітря

$$\Delta H_{1-2} = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 1,039 \cdot (728 - 291) = 4540 \text{ кДж,}$$

$$\text{де } c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{28} = 1,039 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ – масова ізобарна теплоємність;}$$

$$\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) \text{ – мольна ізобарна теплоємність;}$$

$$\text{зміна ентропії повітря } \Delta S_{1-2} = M \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 10 \cdot 0,743 \cdot \ln \frac{728}{291} = 6,8 \text{ кДж/К.}$$

$$\text{Робота зміни об'єму } L_{1-2} = 0.$$

$$\text{Кількість теплоти } Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} = 3247 \text{ кДж.}$$

Ізобарний процес 2-3 :

$$\Delta U_{2-3} = M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) = 10 \cdot 0,743 \cdot (291 - 728) = -3247 \text{ кДж;}$$

$$\Delta H_{2-3} = M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 10 \cdot 1,039 \cdot (291 - 728) = -4540 \text{ кДж;}$$

$$\Delta S_{2-3} = M \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 10 \cdot 1,039 \cdot \ln \frac{291}{728} = -9,53 \text{ кДж/К;}$$

$$Q_{2-3} = \Delta H_{2-3} = -4540 \text{ кДж;}$$

$$L_{2-3} = Q_{2-3} - \Delta U_{2-3} = -4540 - (-3247) = -1293 \text{ кДж.}$$

Ізотермічний процес

5.4.16. Повітря ($\mu = 29$ кг/кмоль) об'ємом $V_1 = 20 \text{ м}^3$ при температурі $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ізотермічно розширюється від початкового абсолютного тиску $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$, до кінцевого абсолютного тиску $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити масу повітря, кінцевий об'єм повітря, роботу і кількість тепла в процесі.

Розв'язання

Маса повітря визначається з рівняння стану

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 20}{287 \cdot (27 + 273)} = 116 \text{ кг,}$$

$$\text{де } R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} - \text{газова стала повітря.}$$

Об'єм наприкінці розширення визначається з рівняння ізотерми (див. табл. 5.1)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}, V_2 = V_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = 20 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6} = 100 \text{ м}^3.$$

Робота в ізотермічному процесі

$$L = M \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = 116 \cdot 0,287 \cdot 300 \cdot \ln \frac{100}{20} = 16074 \text{ кДж} = 16 \text{ МДж.}$$

Кількість тепла в ізотермічному процесі дорівнює виконаній роботі, тобто $Q = L = 16 \text{ МДж}$.

5.4.17. Газ H_2 масою $M = 5,5$ кг при абсолютному тиску $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ стискається ізотермічно, внаслідок цього його об'єм зменшується в $\varepsilon = 3,9$ разів. Визначити початковий і кінцевий об'єми газу, кількість відведеного тепла, роботу стиску та зміну внутрішньої енергії. Виконати графічну інтерпретацію процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Визначаємо об'єм газу на початку процесу за допомогою рівняння стану ідеального газу

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{5,5 \cdot 4157 \cdot (20 + 273)}{0,4 \cdot 10^6} = 16,7 \text{ м}^3,$$

де $R = 4157 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома газова стала H_2 .

$$\text{Кінцевий об'єм газу } V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{16,7}{3,9} = 4,28 \text{ м}^3.$$

В ізотермічному процесі зміна внутрішньої енергії газу $\Delta U = 0$, а робота газу L дорівнює кількості теплоти Q

$$L = Q = M \cdot T \cdot \Delta S, \text{ де } T = T_1 = T_2 = 20 + 273 = 293 \text{ К};$$

$$\Delta S = R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = 4,157 \cdot \ln \frac{4,28}{16,7} = -5,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$L = Q = 5,5 \cdot 293 \cdot (-5,6) = -9,02 \text{ МДж}.$$

Будуємо графіки ізотермічного процесу.

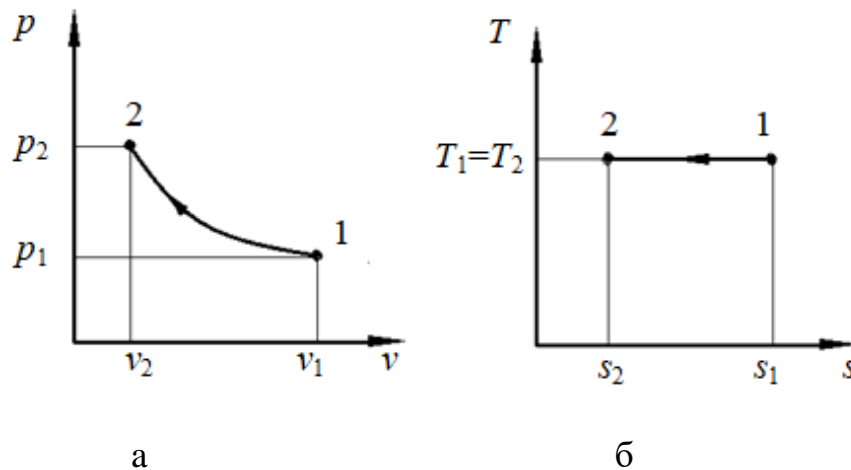


Рисунок 5.8 – Графіки ізотермічного процесу стискання
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.18. Окис вуглецю, який має приведений до нормальних умов об'єм $V_n = 5 \text{ м}^3$, знаходиться у стані при тиску $p_1 = 20 \text{ бар}$ і температурі $t_1 = 227 \text{ }^\circ\text{C}$. В ізотермічному процесі до газу підводиться тепло $Q = 120 \text{ кДж}$.

Знайти параметри p, v початкового і кінцевого станів, роботу розширення, зміну внутрішньої енергії і ентальпії.

Розв'язання

Маса CO визначається з рівняння $p_n \cdot V_n = M \cdot R \cdot T_n$. Звідки

$$M = \frac{p_n \cdot V_n}{R \cdot T_n} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 5}{297 \cdot 273} = 6,25 \text{ кг},$$

де $R = \frac{8314}{\mu_{\text{CO}}} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала окису вуглецю.

Питомий об'єм окису вуглецю у початковому стані

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{297 \cdot 500}{20 \cdot 10^5} = 0,074 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Питомий об'єм газу в кінцевому стану визначимо із рівняння

$$Q = M \cdot T_1 \cdot R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1},$$

$$\text{звідки } \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{Q}{M \cdot T_1 \cdot R} = \frac{120}{6,25 \cdot 500 \cdot 0,297} = 0,129$$

$$\text{і } \frac{v_2}{v_1} = e^{0,129}, \quad v_2 = v_1 \cdot e^{0,129} = 0,074 \cdot e^{0,129} = 0,084 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Значення тиску в кінцевому стані газу знайдемо із рівняння ізотерми

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad p_2 = p_1 \cdot \frac{v_1}{v_2} = 20 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,074}{0,084} = 17,6 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Зміна внутрішньої енергії ΔU і ентальпії ΔH дорівнює нулеві, тому що в ізотермічному процесі $T_1 = T_2$.

5.4.19. В компресорі, який охолоджується ідеально відбувається ізотермічне стискання повітря. В компресор поступає $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ газу (у перерахунку на нормальні умови) при параметрах $p_1 = 0,95 \text{ бар}$ і $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск повітря за компресором $p_2 = 9,0 \text{ бар}$.

Знайти теоретичну потужність приводного двигуна і теоретичну годинну витрату води $M_{\text{в}}$ на охолодження компресора, якщо вода нагрівається на $\Delta t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Теплоємність води прийняти $c_{p_{\text{в}}} = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

Розв'язання

Визначаємо масову витрату повітря, яке надходить у компресор

$$M_{\text{п}} = \frac{p_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}}}{R \cdot T_{\text{н}}} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 1000}{287 \cdot 273} = 1293 \text{ кг/год}.$$

Питома робота, яка витрачається для ізотермічного стискання повітря від p_1 до p_2

$$l = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = 0,287 \cdot 290 \cdot \ln \frac{0,98}{9} = -184,5 \text{ кДж/кг}.$$

Теоретична потужність приводного двигуна компресора визначаємо за формулою

$$N_{\text{Т}} = M_{\text{п}} \cdot |l| = \frac{1293 \cdot 184,5}{3600} = 66,3 \text{ кВт}.$$

В ідеальному компресорі при ізотермічному стисканні газу робота стискання L дорівнює кількості відведеної теплоти Q , тому кількість охолоджуючої води M_B визначаємо з рівняння теплового балансу

$$Q = L = M_{\text{п}} \cdot |l| = M_B \cdot c_{p_B} \cdot \Delta t_B,$$

$$\text{звідки } M_B = \frac{M_{\text{п}} \cdot |l|}{c_{p_B} \cdot \Delta t_B} = \frac{1293 \cdot 184,5}{4,19 \cdot 15} = 3796 \text{ кг/год.}$$

5.4.20. При ізотермічному розширенні вуглекислого газу масою 10 кг, який знаходиться під надлишковим тиском 0,4 МПа при температурі 27 °С, його об'єм зростає в 5 разів. Знайти роботу розширення, кінцеві параметри газу, а також кількість підведеного тепла. Атмосферний тиск дорівнює $B = 10^5$ Па. Зобразити процес в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Абсолютний тиск вуглекислого газу в початковому стані

$$p_1 = p_{\text{н}} + B = 0,4 \cdot 10^6 + 10^5 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,5 \text{ МПа.}$$

Газова стала вуглекислого газу табл. 2 (див. додатки)

$$R = 188,9 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К).}$$

Початковий об'єм знайдено за рівнянням стану

$$V_1 = \frac{MRT_1}{p_1} = \frac{10 \cdot 188,9 \cdot 300}{0,5 \cdot 10^6} = 0,376 \text{ м}^3.$$

$$\text{Кінцевий об'єм газу } V_2 = 5 \cdot V_1 = 0,376 \cdot 5 = 1,88 \text{ м}^3.$$

Кінцевий тиск знайдемо, записавши рівняння ізотермічного процесу для двох станів газу

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2}, \text{ звідси } p_2 = \frac{V_1 \cdot p_1}{V_2} = \frac{0,376 \cdot 0,5}{5} = 0,1 \text{ МПа.}$$

$$\text{Робота розширення } L = M \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = 5 \cdot 188,9 \cdot 300 \cdot \ln \frac{1,88}{0,376} = 906,7 \text{ кДж.}$$

Кількість підведеного тепла в ізотермічному процесі дорівнює роботі розширення, тобто $Q = L = 906,7$ кДж.

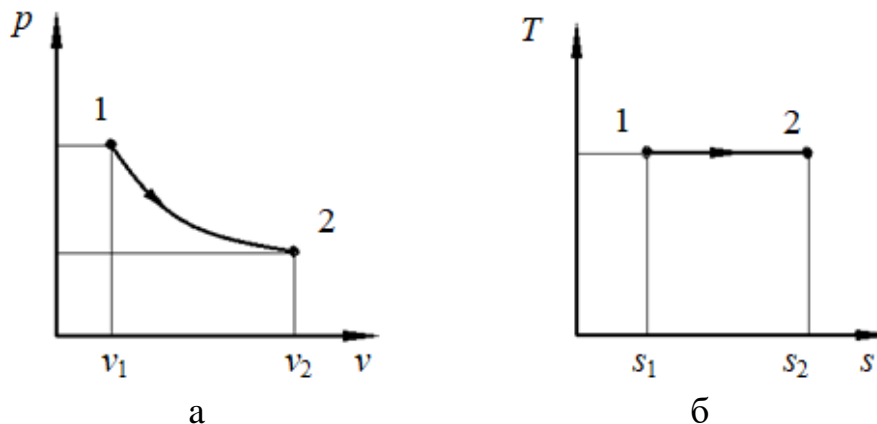


Рисунок 5.9 – Графіки ізотермічного процесу:
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

Адіабатний процес

5.4.21. Газ H_2 об'ємом $V_1 = 3,4 \text{ м}^3$ температура якого дорівнює $t_1 = 75^\circ\text{C}$ і тиск $p_1 = 2,1 \text{ МПа}$, розширюється адіабатно в $\varepsilon = \frac{V_2}{V_1} = 5,0$ разів. Визначити кінцеві параметри газу, зміну калоричних параметрів, а також отриману роботу. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Визначаємо кінцеві параметри газу, скориставшись рівнянням адіабати і рівнянням стану ідеального газу.

Кінцеву температуру газу T_2 знаходимо з рівняння

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}, \quad T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}} = \frac{(75 + 273)}{5^{(1,4-1)}} = 183 \text{ К},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів.

Кінцевий об'єм

$$V_2 = V_1 \cdot \varepsilon = 3,4 \cdot 5 = 17 \text{ м}^3.$$

Маса газу

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 3,4}{4157 \cdot 348} = 5 \text{ кг},$$

де $R = 4157 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома газова стала H_2 ;

$$T_1 = t_1 + 273 = 75 + 273 = 348 \text{ К}.$$

$$\text{Питомі об'єми: } v_2 = \frac{V_2}{M} = \frac{17}{5} = 3,4 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{3,4}{5} = 0,68 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Кінцевий тиск

$$p_2 = \frac{M \cdot R \cdot T_2}{V_2} = \frac{5 \cdot 4157 \cdot 183}{17} = 0,22 \cdot 10^6 = 0,22 \text{ МПа},$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів:

зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 5 \cdot 10,4 \cdot (183 - 348) = -8,58 \text{ МДж},$$

де c_v , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – масова ізохорна теплоємність H_2 ,

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{2} = 10,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізохорна теплоємність двохатомних

газів,

$\mu = 2 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмоль H_2 ;

зміна ентальпії газу

$$\Delta H = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 5 \cdot 14,55 \cdot (183 - 348) = -12 \text{ МДж},$$

де c_p , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – масова ізобарна теплоємність H_2 ,

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{2} = 14,55 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних газів.

Робота адиабатного процесу

$$L = -\Delta U = 8,58 \text{ МДж}.$$

Будуємо графіки адиабатного процесу.

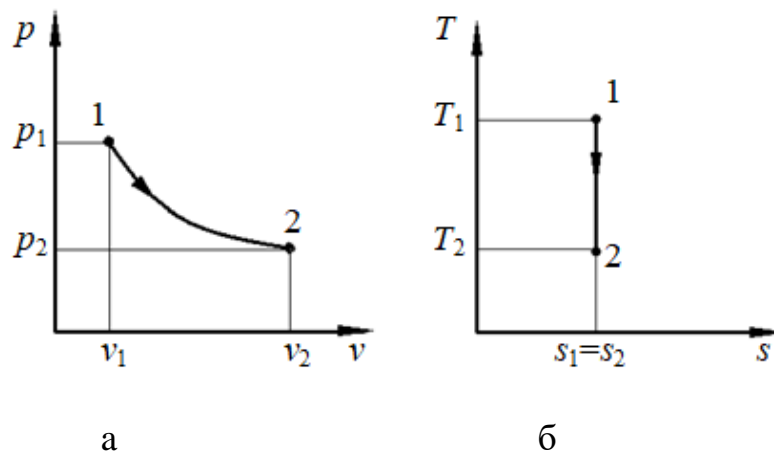


Рисунок 5.10 – Графіки адиабатного процесу розширення:
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.22. В компресор газотурбінної установки заходить $M = 5 \text{ кг}$ повітря з початковими параметрами: $p_1 = 100 \text{ кПа}$ і $t_1 = 27^\circ \text{C}$. Повітря адиабатно стискується до тиску $p_2 = 4 \text{ МПа}$. Визначити початковий і кінцевий об'єми повітря, кінцеву температуру, роботу стиску, зміну внутрішньої енергії і ентропії. Показник адіабати для двохатомного ідеального газу $k = 1,4$.

Розв'язання

Початковий об'єм знайдемо з рівняння стану

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{5 \cdot 287 \cdot 300}{100000} = 4,3 \text{ м}^3.$$

Кінцевий об'єм визначаємо з рівняння адіабати

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k, \text{ звідки } V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 4,3 \cdot \left(\frac{100}{4000} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,262 \text{ м}^3.$$

Кінцеву температуру можна визначити з рівняння адіабати або з рівняння стану

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot V_2}{R} = \frac{4 \cdot 10^6 \cdot 0,262}{5 \cdot 287} = 720 \text{ К}.$$

Роботу стиску визначаємо по формулі з табл. 5.1 для адиабатного процесу

$$L = M \cdot \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) = 5 \cdot \frac{0,287}{1,4-1} \cdot (300 - 720) = -1550 \text{ кДж.}$$

В адіабатному процесі стиску внутрішня енергія робочого тіла зростає і зміна її дорівнює роботі з протилежним знаком $\Delta U = -L = 1550 \text{ кДж}$.

В адіабатному процесі $S = const$, тому $\Delta S = 0$.

5.4.23. Газ CH_4 масою $M = 10 \text{ кг}$, тиск якого дорівнює $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$, а температура $t_1 = 29^\circ \text{C}$, стискується адіабатно в циліндрі компресора до абсолютного тиску $p_2 = 3,5 \text{ МПа}$. Визначити кінцеву температуру стиснутого газу, зміну його внутрішньої енергії, ентальпії, роботу стиснення і тепло. Виконати графічну інтерпретацію процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Визначаємо кінцеву температуру стиснутого газу, використавши рівняння адіабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 302 \cdot \left(\frac{3,5}{0,3} \right)^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 524 \text{ К,}$$

де $k = 1,29$ – показник адіабати для багатоатомних газів;

$$T_1 = t_1 + 273 = 29 + 273 = 302 \text{ К.}$$

Знаходимо зміну калоричних параметрів:

зміна внутрішньої енергії газу

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 1,82 \cdot (524 - 302) = 4040 \text{ кДж,}$$

де $c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{29,1}{16} = 1,82 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ – масова ізохорна теплоємність газу

CH_4 , $\mu c_v = 29,1 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$ – мольна ізохорна теплоємність багатоатомних газів; $\mu = 16 \text{ кг/кмоль}$ – маса 1 кмоль газу CH_4 ;

зміна ентальпії газу

$$\Delta H = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 2,34 \cdot (524 - 302) = 5195 \text{ кДж,}$$

де $c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{37,4}{16} = 2,34 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ – масова ізобарна теплоємність CH_4 ;

$\mu c_p = 37,4 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$ – мольна ізобарна теплоємність багатоатомних газів.

В адіабатному процесі тепло не підводиться і не відводиться. Тому $Q = 0$ і $\Delta S = 0$. Затрачена робота $L = -\Delta U = -4040 \text{ кДж}$.

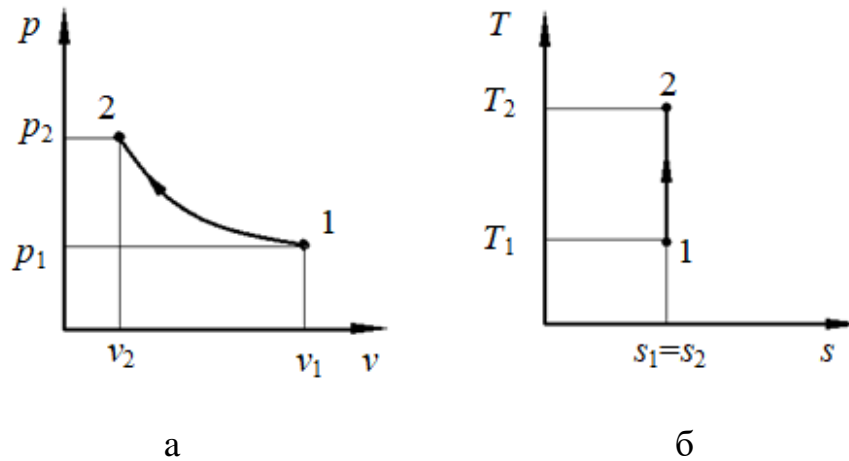


Рисунок 5.11 – Графіки адиабатного процесу стиску:
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.24. Із балону ємністю $0,07 \text{ м}^3$, наповненого азотом, газ випускається в атмосферу настільки швидко, що теплообмін між нею і азотом в балоні не відбувається (адиабатний процес розширення газу). До випуску тиск в балоні дорівнює $p_1 = 15 \text{ МПа}$, а температура $t_1 = 17^\circ \text{С}$. Після закриття вентилля температура в балоні стала $t_2 = 1^\circ \text{С}$. Визначити масу азоту, яка була випущена і яким став тиск в балоні. Азот двохатомний газ, тому показник адиабати $k = 1,4$.

Розв'язання

Для визначення тиску в балоні після випуску газу використаємо рівняння адиабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ отже } p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 15 \cdot \left(\frac{274}{290} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 12,3 \text{ МПа.}$$

Масу азоту, яка була випущена з балону знайдемо, записавши рівняння Клапейрона для двох станів газу

$$p_1 \cdot V_1 = M \cdot R \cdot T_1, \quad M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot 0,07}{297 \cdot 290} = 12,2 \text{ кг.}$$

$$p_2 \cdot V_2 = M \cdot R \cdot T_2, \quad M = \frac{p_2 \cdot V_2}{R \cdot T_2} = \frac{12,3 \cdot 10^6 \cdot 0,07}{297 \cdot 274} = 10,6 \text{ кг,}$$

$$\text{отже } \Delta M = M_1 - M_2 = 12,2 - 10,6 = 1,6 \text{ кг.}$$

5.4.25. В соплах і на лопатках газової турбіни адиабатно розширюється $M = 2500 \text{ кг/год}$ вуглекислого газу. Параметри газу на вході в турбіну: $p_1 = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_1 = 750^\circ \text{С}$, на виході з турбіни $p_2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Визначити параметри CO_2 на виході з турбіни t_2, v_2 , питому корисну роботу газу і теоретичну потужність турбіни N_T .

Розв'язання

Температуру на виході з турбіни визначимо, скориставшись рівнянням адиабати (див. табл. 5.1)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки } T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

де $k = 1,29$ – показник адіабати для трьохатомних газів,

$$\text{отже } T_2 = 1023 \cdot \left(\frac{0,98 \cdot 10^5}{9 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 621 \text{ К або } t_2 = 348^\circ \text{C}.$$

Питомий об'єм на виході із газової турбіни визначимо за рівнянням

$$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} = \frac{189 \cdot 621}{0,98 \cdot 10^5} = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг},$$

де $R = 189$ Дж/(кг·К) – газова стала CO_2 .

Питома корисна робота розширення газу

$$L = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{0,189}{1,29-1} \cdot (1023 - 621) = 262 \text{ кДж/кг}.$$

Теоретична потужність турбіни

$$N_T = \frac{M \cdot l}{3600} = \frac{2500 \cdot 262}{3600} = 182 \text{ кВт}.$$

5.4.26. Робота, яка витрачена на адіабатний стиск 4,5 кг повітря в компресорі, складає $L = -420$ кДж. Параметри повітря на вході в компресор: $t_1 = 17^\circ \text{C}$, $p_1 = 1$ бар. Визначити кінцеві параметри стану, зміну внутрішньої енергії та ступінь стиску повітря.

Розв'язання

Кінцеву температуру повітря визначимо з формули

$$L = M \cdot \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2), \text{ звідки } T_2 = T_1 + \frac{L \cdot (k-1)}{M \cdot R},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів;

$R = 287$ Дж/(кг·К) – газова стала повітря.

$$\text{Отже, } T_2 = 290 + \frac{420 \cdot (1,4-1)}{4,5 \cdot 0,287} = 420 \text{ К}.$$

Кінцевий тиск повітря визначимо з рівняння адіабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки } p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 1 \cdot \left(\frac{420}{290} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 3,66 \text{ бар}.$$

Внутрішня енергія в адіабатному процесі визначається з виразу

$$\Delta U = -L = 420 \text{ кДж}.$$

Ступінь стиску визначаємо з відношення $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$,

де V_1 і V_2 – об'єми, які займає повітря на початку і в кінці стиску і визначаються з рівняння Клапейрона

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{4,5 \cdot 287 \cdot 290}{10^5} = 3,74 \text{ м}^3,$$

$$V_2 = \frac{M \cdot R \cdot T_2}{p_2} = \frac{4,5 \cdot 287 \cdot 420}{10^5} = 1,48 \text{ м}^3,$$

$$\text{отже } \varepsilon = \frac{3,74}{1,48} = 2,53.$$

Питомий об'єм в кінці стиску повітря

$$v_2 = \frac{V_2}{M} = \frac{1,48}{4,5} = 0,329 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

5.4.27. Газ Ar масою $M = 10 \text{ кг}$, початковий тиск якого дорівнює $p_1 = 1,1 \text{ МПа}$, а температура $t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, розширюється адіабатно, унаслідок чого порівняно з початковим значенням тиск зменшується в $\lambda = 2,3$ разів. Після цього газ піддається ізохорному охолодженню до тиску $p_3 = 0,44 \text{ МПа}$. Визначити відсутні параметри на початку і наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, ентальпію та ентропію, роботу і кількість тепла. Допустити, що теплоємність газу стала. Зобразити графіки процесів в $p-v$ і $T-s$ координатах.

Розв'язання

Визначаємо відсутні початкові та кінцеві параметри газу у кожному процесі. Графічне зображення процесів показано на рис. 5.12 – 5.13.

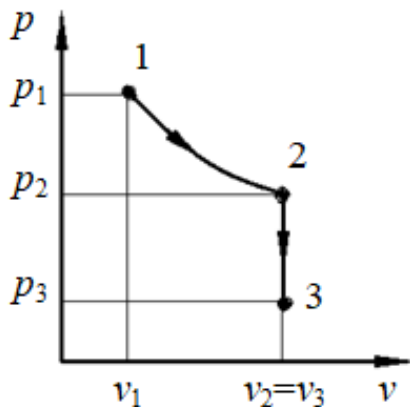


Рисунок 5.12 – Адіабатний 1-2 і ізохорний 2-3 процеси в $p-v$ координатах

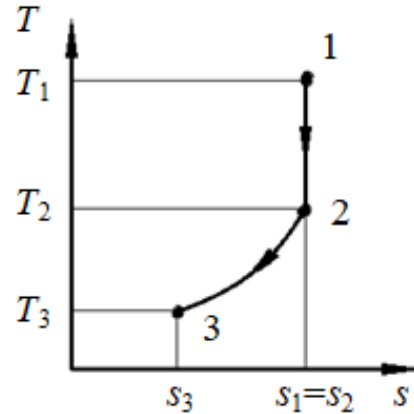


Рисунок 5.13 – Адіабатний 1-2 і ізохорний 2-3 процеси в $T-s$ координатах

Точка 1: $p_1 = 1,1 \text{ МПа}$, $T_1 = t_1 + 273 = 150 + 273 = 423 \text{ К}$.

Користуючись рівнянням стану газу знаходимо V_1

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{10 \cdot 208 \cdot 423}{1,1 \cdot 10^6} = 0,8 \text{ м}^3,$$

де $R = 208 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала Ar.

$$\text{Питомий об'єм } v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{0,8}{10} = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\text{Точка 2: } \frac{p_1}{p_2} = \lambda; \quad p_2 = \frac{p_1}{\lambda} = \frac{1,1}{2,3} = 0,478 \text{ МПа}.$$

За рівнянням адіабати знаходимо кінцевий питомий об'єм v_2 і температуру T_2

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k \text{ або } \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{v_2}{v_1}; \quad v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,08 \cdot 2,3^{1,66} = 0,132 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_2 = \frac{T_1}{\lambda^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{423}{2,3^{\frac{1,66-1}{1,66}}} = 304 \text{ К}.$$

де $k = 1,66$ – показник адіабати для одноатомних газів.

$$V_2 = M \cdot v_2 = 10 \cdot 0,132 = 1,32 \text{ м}^3.$$

Точка 3:

Температуру знаходимо за рівнянням ізохори

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}; \quad T_3 = \frac{p_3 \cdot T_2}{p_2} = \frac{0,44 \cdot 304}{0,478} = 280 \text{ К}.$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів, роботу і кількість теплоти у кожному процесі.

Адіабатний 1-2 процес розширення газу:

зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 0,312 \cdot (304 - 423) = -371 \text{ кДж},$$

$$\text{де } c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{12,5}{40} = 0,312 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \text{ – масова ізохорна теплоємність Аг};$$

$\mu c_v = 12,5 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізохорна теплоємність одноатомних газів;

$\mu = 40 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмолью Аг;

зміна ентальпії газу

$$\Delta H_{1-2} = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 0,52 \cdot (304 - 423) = -619 \text{ кДж},$$

$$\text{де } c_p = c_v + R = 0,312 + 0,208 = 0,52 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ – масова ізобарна}$$

теплоємність газу;

$$\text{зміна ентропії } \Delta S_{1-2} = 0;$$

$$\text{теплота, яка приймає участь у процесі } Q_{1-2} = 0;$$

$$\text{робота розширення газу } L_{1-2} = -\Delta U_{1-2} = 371 \text{ кДж}.$$

Ізохорний 2-3 процес охолодження газу:

зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_{2-3} = M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) = 10 \cdot 0,312 \cdot (280 - 304) = -75 \text{ кДж};$$

зміна ентальпії газу

$$\Delta H_{2-3} = M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 10 \cdot 0,52 \cdot (280 - 304) = -125 \text{ кДж};$$

$$\text{зміна ентропії } \Delta S_{2-3} = M \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 10 \cdot 0,312 \cdot \ln \frac{280}{304} = -0,257 \text{ кДж/К};$$

кількість теплоти, яка приймає участь в процесі $Q_{2-3} = \Delta U_{2-3} = -75 \text{ кДж};$

робота процесу $L_{2-3} = 0.$

5.4.28. Газ O_2 об'ємом $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$, початковий тиск якого становить $p_1 = 0,22 \text{ МПа}$, а температура $t_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$, розширюється ізотермічно до об'єму $V_2 = 3,4 \text{ м}^3$, після чого адіабатно стискується до початкового об'єму. Визначити відсутні параметри стану газу на початку і наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, розрахувати ентальпію, роботу і кількість тепла. Зобразити графіки процесів в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Графіки ізотермічного і адіабатного процесів рис. 5.14, 5.15.

Визначаємо відсутні параметри стану газу на початку і наприкінці кожного процесу.

Точка 1: $p_1 = 0,22 \text{ МПа}$, $t_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_1 = t_1 + 273 = 32 + 273 = 305 \text{ К};$

$$\text{питомий об'єм } v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{1,5}{4,2} = 0,36 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

де M , кг – маса газу.

З рівняння стану знаходимо масу M газу

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{0,22 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{259,8 \cdot 305} = 4,2 \text{ кг},$$

де $R = 259,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала O_2 .

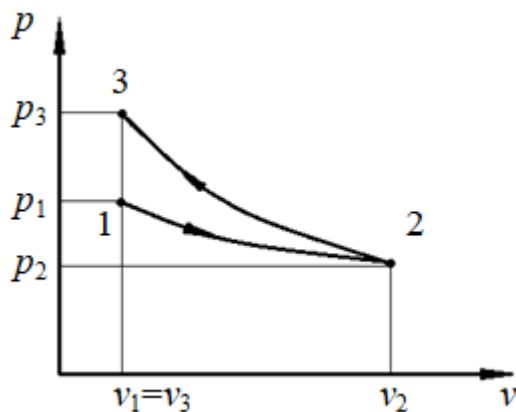


Рисунок 5.14 – Ізотермічний 1-2 адіабатний 2-3 процеси в p - v координатах

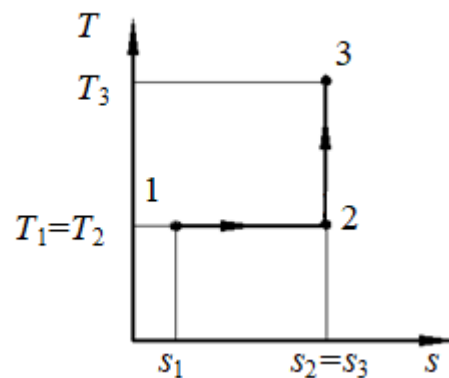


Рисунок 5.15 – Ізотермічний 1-2 і адіабатний 2-3 процеси в T - s координатах

$$\text{Точка 2: } T_2 = T_1 = 305 \text{ К}; v_2 = \frac{V_2}{M} = \frac{3,4}{4,2} = 0,81 \text{ м}^3/\text{кг};$$

тиск визначаємо з рівняння ізотерми

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}; p_2 = \frac{p_1 \cdot v_1}{v_2} = \frac{0,22 \cdot 0,36}{0,81} = 0,098 \text{ МПа.}$$

Точка 3: $v_3 = v_1 = 0,36 \text{ м}^3/\text{кг}$; тиск p_3 і температуру T_3 газу знаходимо з рівняння адиабати

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^k, p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^k = 0,098 \cdot \left(\frac{0,81}{0,36}\right)^{1,4} = 0,3 \text{ МПа,}$$

де $k = 1,4$ – показник адиабати для двохатомних газів.

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}; T_3 = T_2 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = 305 \cdot \left(\frac{0,81}{0,36}\right)^{1,4-1} = 422 \text{ К.}$$

Визначаємо зміну внутрішньої енергії і ентальпії, роботу і теплоту у кожному процесі.

Ізотермічний процес 1-2

Тому що $T_1 = T_2$, зміна внутрішньої енергії газу $\Delta U_{1-2} = 0$, зміна ентальпії газу $\Delta H_{1-2} = 0$.

Робота розширення газу

$$L_{1-2} = M \cdot R \cdot T \ln \frac{v_2}{v_1} = 4,2 \cdot 0,2598 \cdot 305 \cdot \ln \frac{0,81}{0,36} = 270 \text{ кДж,}$$

Кількість теплоти в процесі

$$Q_{1-2} = L_{1-2} = 270 \text{ кДж.}$$

Адиабатний процес 2-3

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_{2-3} = M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) = 4,2 \cdot 0,65 \cdot (422 - 305) = 319 \text{ кДж,}$$

де $c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{32} = 0,65 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – масова ізохорна теплоємність

двохатомних газів; $\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізохорна теплоємність газу O_2 ; $\mu = 32 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмоль газу O_2 .

Зміна ентальпії газу

$$\Delta H_{2-3} = M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 4,2 \cdot 0,91 \cdot (422 - 305) = 447 \text{ кДж,}$$

де $c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{32} = 0,91 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – масова ізобарна теплоємність газу O_2 ;

$\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних газів.

Кількість теплоти в процесі $Q_{2-3} = 0$.

Робота в процесі

$$L_{2-3} = \frac{M \cdot R}{k-1} \cdot (T_2 - T_3) = \frac{4,2 \cdot 0,2598}{1,4-1} \cdot (305 - 422) = -319 \text{ кДж.}$$

Політропний процес

5.4.29. Кисень, який при абсолютному тиску $p_1 = 0,10 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 17^\circ \text{С}$, займає об'єм 5 л, політропно стискується до абсолютного тиску $p_2 = 0,95 \text{ МПа}$ і об'єму 0,8 л.

Визначити показник політропи, масу кисню, кінцеву температуру і роботу стиску.

Розв'язання

Показник політропи визначається за рівнянням

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n.$$

Логарифмуючи, одержимо

$$n \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} = \ln \frac{p_2}{p_1}, \text{ звідки маємо } n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{V_1}{V_2}} = \frac{\ln \frac{0,95 \cdot 10^6}{0,10 \cdot 10^6}}{\ln \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}}} = 1,23.$$

Масу кисню визначимо з рівняння стану (1.15)

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{260 \cdot 290} = 0,0066 \text{ кг},$$

де $R = 260 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала кисню.

Кінцева температура кисню визначається з рівняння політропи

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ звідки маємо}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 290 \cdot \left(\frac{0,95 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1,23-1}{1,23}} = 448 \text{ К}.$$

Робота стиску визначається за рівнянням

$$L = M \cdot \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = 0,0066 \cdot \frac{260}{1,23-1} \cdot (290 - 448) = 1178,8 \text{ Дж} = 1,178 \text{ кДж}.$$

5.4.30. Азот масою $M = 10 \text{ кг}$ розширюється по політропі до кінцевого тиску $p_2 = 100 \text{ кПа}$ і кінцевої температури $t_2 = 27^\circ \text{С}$. Початкові параметри азоту: $p_1 = 15 \text{ бар}$, $t_1 = 327^\circ \text{С}$. Визначити показник політропи, початковий і кінцевий об'єми, зміну внутрішньої енергії, ентропії, роботу і теплоту процесу. Залежність теплоємності від температури вважати нелінійною.

Розв'язання

Кінцевий об'єм знаходимо з рівняння (1.15):

$$V_2 = \frac{M \cdot R \cdot T_2}{p_2} = \frac{10 \cdot 297 \cdot 300}{100 \cdot 10^3} = 8,91 \text{ м}^3,$$

де $R = 297$ Дж/(кг·К) – газова стала азоту.

Показник політропи визначимо з рівняння політропи (див. табл. 5.1)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ звідки } \frac{n-1}{n} = \frac{\ln \frac{T_2}{T_1}}{\ln \frac{p_2}{p_1}} = \frac{\ln \frac{300}{600}}{\ln \frac{100}{1500}} = 0,256, \text{ отже } n = 1,34.$$

Початковий об'єм визначаємо з рівняння політропи (див. табл. 5.1)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n, \text{ звідки } V_1 = V_2 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = 8,91 \cdot \left(\frac{100}{1500}\right)^{\frac{1}{1,34}} = 1,18 \text{ м}^3.$$

Зміну внутрішньої енергії визначаємо за формулою

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1),$$

$$\text{де } c_{vm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{vm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_{vm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{c_{vm}|_0^{27} \cdot 27 - c_{vm}|_0^{327} \cdot 327}{27 - 327} = \frac{0,7424 \cdot 27 - 0,754 \cdot 327}{-300} = 0,755 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

$$\Delta U_{1-2} = 10 \cdot 0,755 \cdot (27 - 327) = -2265 \text{ кДж}.$$

Кількість теплоти в процесі визначаємо за формулою

$$Q_{1-2} = M \cdot c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (t_2 - t_1) = 10 \cdot 0,755 \cdot \frac{1,34-1,4}{1,34-1} \cdot (27 - 327) = 400 \text{ кДж},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів.

Визначаємо роботу розширення в процесі за формулою (див. табл. 5.1)

$$L_{1-2} = M \cdot \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = 10 \cdot \frac{0,297}{1,34-1} \cdot (600 - 300) = 2620 \text{ кДж}.$$

Зміну ентропії визначаємо за формулою

$$\Delta S_{1-2} = M \cdot c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 10 \cdot 0,755 \cdot \frac{1,34-1,4}{1,34-1} \cdot \ln \frac{300}{600} = 1,0 \text{ кДж/К}.$$

5.4.31. Повітря об'ємом $V = 2,3 \text{ м}^3$, абсолютний тиск якого дорівнює $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$, а початкова температура $t_1 = 30 \text{ °C}$, стискується політропно до абсолютного тиску $p_2 = 1,6 \text{ МПа}$. Показник політропного стиснення $n = 1,6$. Визначити температуру, об'єм газу наприкінці стиснення, обчислити роботу, витрачену на цей процес, кількість тепла і зміну калоричних параметрів. Зобразити графіки процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Знаходимо невизначені початкові та кінцеві параметри повітря політропного процесу стиску.

$$\text{Точка 1. } p_1 = 0,5 \text{ МПа, } T_1 = t_1 + 273 = 30 + 273 = 303 \text{ К; } V_1 = 2,3 \text{ м}^3.$$

За допомогою рівняння стану ідеального газу визначаємо масу M газу.

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 2,3}{287 \cdot 303} = 13,2 \text{ кг},$$

де $R = 287$ Дж/(кг·К) – питома газова стала повітря.

Питомий об'єм повітря

$$v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{2,3}{13,2} = 0,174 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2. $p_2 = 1,6$ МПа. Температуру та питомий об'єм повітря знаходимо, скориставшись рівнянням політропного процесу

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ звідки } T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 303 \cdot \left(\frac{1,6}{0,5}\right)^{\frac{1,6-1}{1,6}} = 469 \text{ К};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \text{ або } \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{v_1}{v_2}, \text{ звідки } v_2 = \frac{v_1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{0,174}{\left(\frac{1,6}{0,5}\right)^{\frac{1}{1,6}}} = 0,084 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_2 = M \cdot v_2 = 13,2 \cdot 0,084 = 1,11 \text{ м}^3.$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів, роботу та тепло процесу.

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 13,2 \cdot 0,72 \cdot (469 - 303) = 1578 \text{ кДж},$$

$$\text{де } c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{29} = 0,72 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{ масова ізохорна теплоємність}$$

повітря; $\mu c_v = 20,8$ кДж/(кмоль·К) – мольна ізохорна теплоємність двоатомних газів; $\mu = 29$ кг/кмоль – маса 1 кмоль газу повітря.

Зміна ентальпії газу

$$\Delta H_{1-2} = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 13,2 \cdot 1,033 \cdot (469 - 303) = 2198 \text{ кДж},$$

$$\text{де } c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{29} = 1,003 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{ масова ізобарна теплоємність}$$

повітря; $\mu c_p = 29,1$ кДж/(кмоль·К) – мольна ізобарна теплоємність двоатомних газів.

Зміна ентропії повітря

$$\Delta S_{1-2} = M \left(c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} \right) = 13,2 \cdot \left(0,72 \cdot \ln \frac{469}{303} + 0,297 \cdot \ln \frac{0,084}{0,174} \right) = 1,29 \text{ кДж}/\text{К},$$

де $k = 1,4$ – показник адиабати.

Робота, яка витрачена в процесі,

$$L_{1-2} = M \cdot \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = 13,2 \cdot \frac{0,287}{1,6-1} \cdot (303 - 469) = -1048 \text{ кДж}.$$

Тепло, яке приймає участь в процесі,

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2} = 1578 + (-1048) = 530 \text{ кДж}.$$

Будуємо графіки політропного процесу.

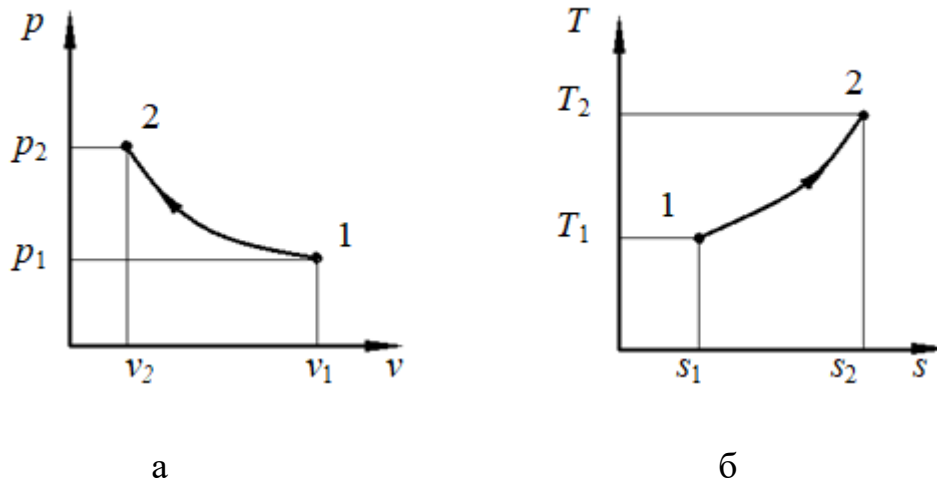


Рисунок 5.16 – Графіки політропного процесу стиску
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах.

5.4.32. Газ Ar об'ємом $V_1 = 2,3 \text{ м}^3$, який має початкові параметри $p_1 = 1,3 \text{ МПа}$ і $t_1 = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, розширюється політропно до тиску $p_2 = 0,33 \text{ МПа}$. Об'єм газу змінюється до величини $V_2 = 6 \text{ м}^3$. Визначити показник політропного стиснення, кінцеву температуру, роботу, кількість підведеного тепла і зміну калоричних параметрів. Зобразити графіки процесу в p - v і T - s координатах.

Розв'язання

Визначаємо показник політропного процесу, користуючись рівнянням

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n, \text{ звідки } n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{V_1}{V_2}} = \frac{\ln \frac{0,33}{1,3}}{\ln \frac{2,3}{6}} = 1,43$$

Знаходимо кінцеву температуру газу за допомогою рівняння

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ звідки } T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 413 \cdot \left(\frac{0,33}{1,3}\right)^{\frac{1,43-1}{1,43}} = 274 \text{ К},$$

де $T_1 = t_1 + 273 = 140 + 273 = 413 \text{ К}$.

Визначаємо зміну калоричних параметрів в процесі.

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 34,8 \cdot 0,314 \cdot (274 - 413) = -1519 \text{ кДж},$$

$$\text{де } M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{1,3 \cdot 10^6 \cdot 2,3}{208 \cdot 413} = 34,8 \text{ кг} - \text{ маса газу Ar; } R = 208 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) -$$

газова стала Ar;

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{12,56}{40} = 0,314 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{ масова ізохорна теплоємність Ar;}$$

$\mu c_v = 12,56 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) - \text{ мольна ізохорна теплоємність одноатомних газів;}$

$\mu = 40 \text{ кг}/\text{кмоль} - \text{ маса 1 кмолью газу Ar.}$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta H = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 34,8 \cdot 0,52 \cdot (274 - 413) = -2515 \text{ кДж},$$

$$\text{де } c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{20,8}{40} = 0,52 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{ масова ізобарна теплоємність Ar;}$$

$\mu c_p = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}) - \text{ мольна ізобарна теплоємність одноатомних газів.}$

Зміна ентропії повітря

$$\Delta S = M \cdot c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 34,8 \cdot 0,314 \cdot \frac{1,43-1,66}{1,43-1} \cdot \ln \frac{274}{413} = 2,4 \text{ кДж}/\text{К},$$

де $k = 1,66 - \text{ показник адиабати для одноатомних газів.}$

Робота процесу

$$L = M \cdot \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = 34,8 \cdot \frac{0,208}{1,43-1} \cdot (413 - 274) = 2339 \text{ кДж.}$$

Будуємо графіки політропного процесу

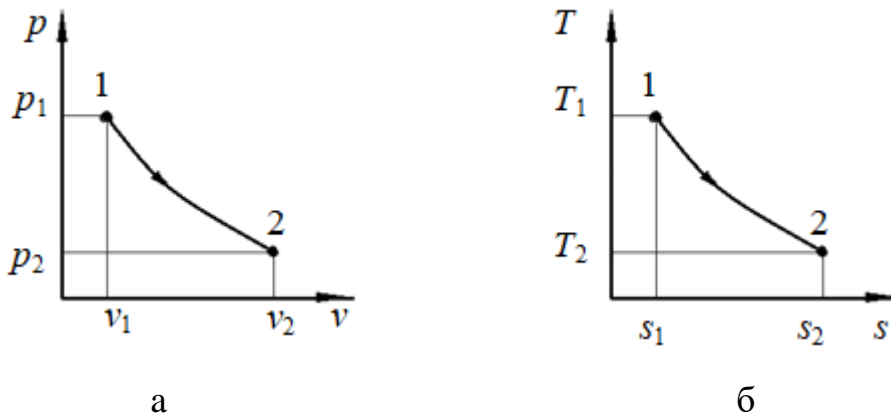


Рисунок 5.17 – Графіки політропного процесу
а – в $p-v$ координатах; б – в $T-s$ координатах

5.4.33. Повітря у турбокомпресорі стискується так, що його тиск збільшується в $\lambda = 2,3$ разів. Показник політропного процесу при цьому дорівнює $n = 1,43$. Обчислити роботу і кількість тепла, витраченого на цей процес, зміну калоричних параметрів, якщо відомі початкові параметри: температура $t_1 = 30^\circ\text{C}$ і тиск $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$. Побудувати графіки процесу в

координатах в p - v і T - s координатах, а також графіки процесів, якщо $n = k$ і $n = \infty$.

Розв'язання

Визначаємо відсутні початкові та кінцеві параметри повітря в процесі стиснення, користуючись рівнянням стану газу та співвідношеннями між параметрами початкового і кінцевого станів політропного процесу.

Точка 1: $T_1 = t_1 + 273 = 30 + 273 = 303\text{К}$, $p_1 = 0,5\text{МПа} = 0,5 \cdot 10^6\text{Па}$.

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 303}{0,5 \cdot 10^6} = 0,174 \text{ м}^3/\text{кг},$$

де $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – газова стала повітря.

Точка 2: $p_2 = \lambda \cdot p_1 = 2,3 \cdot 0,5 = 1,15\text{МПа} = 1,15 \cdot 10^6\text{Па}$;

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ звідки } T_2 = T_1 \cdot (\lambda)^{\frac{n-1}{n}} = 303 \cdot (2,3)^{\frac{1,43-1}{1,43}} = 389 \text{ К};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n, \text{ або } \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{v_1}{v_2}, \text{ звідки } v_2 = \frac{v_1}{\left(\frac{p_2/p_1}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{0,174}{2,3^{\frac{1}{1,43}}} = 0,097 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Обчислюємо зміну калоричних параметрів, роботу і кількість витраченого тепла в процесі.

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,717 \cdot (389 - 303) = 61,6 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$\text{де } c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{29} = 0,717 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ – масова ізохорна теплоємність}$$

повітря; $\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізохорна теплоємність повітря;

$\mu = 29 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмоль повітря.

Зміна ентальпії газу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,0 \cdot (389 - 303) = 86 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$\text{де } c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{29} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ – масова ізобарна теплоємність повітря};$$

$\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність повітря.

Зміна ентропії повітря

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = 0,717 \cdot \ln \frac{389}{303} + 0,287 \cdot \ln \frac{0,097}{0,174} = 0,012 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$\text{Робота процесу } l = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{0,287}{1,43-1} \cdot (303 - 389) = -57,4 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Кількість тепла, витраченого на цей процес,

$$q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = 0,717 \cdot \frac{1,43-1,4}{1,43-1} \cdot (389 - 303) = 4,3 \text{ кДж}/\text{кг},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двоатомних газів.

Будуємо графіки політропного процесу.

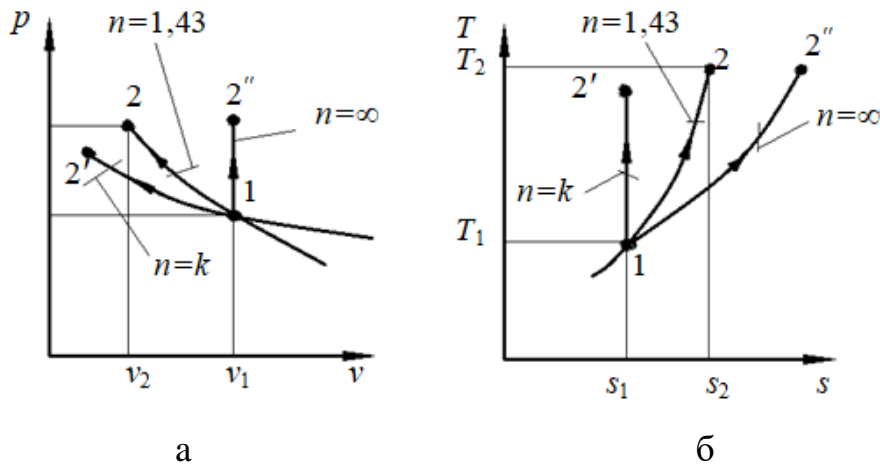


Рисунок 5.18 – Графіки політропного процесу
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.34. У політропному стисненні з показником $n=1,6$ газу CO_2 масою $M=5,5$ кг його об'єм зменшується в $\varepsilon=3,9$ разів. Початковий тиск газу становить $p_1=0,2$ МПа, температура $t_1=25$ °С. Обчислити роботу і кількість тепла, витраченого в цьому процесі, зміну калоричних параметрів, а також кінцевий тиск і температуру газу. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s координатах, а також графіки процесів, що починаються в одній і тій самій точці, якщо $n=k$ і $n=1$.

Розв'язання

Визначаємо відсутні початкові та кінцеві параметри процесу політропного стиснення, скориставшись рівнянням стану та співвідношеннями між параметрами початкового і кінцевого станів політропного процесу.

$$\text{Початковий об'єм газу } V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{5,5 \cdot 188,9 \cdot 298}{0,2 \cdot 10^6} = 1,54 \text{ м}^3,$$

де $R=188,9$ Дж/(кг·К) – газова стала газу CO_2 ,

$$T_1 = t_1 + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ К}; \quad v_1 = \frac{V_1}{M} = \frac{1,54}{5,5} = 0,281 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Кінцевий об'єм газу

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{1,54}{3,9} = 0,394 \text{ м}^3; \quad v_2 = \frac{V_2}{M} = \frac{0,394}{5,5} = 0,071 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Кінцевий тиск газу знаходимо з рівняння

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n, \quad p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n = p_1 \cdot \varepsilon^{1,6} = 0,2 \cdot 3,9^{1,6} = 1,76 \text{ МПа}.$$

Кінцева температура газу

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{n-1} = 298 \cdot 3,9^{1,6-1} = 674 \text{ К.}$$

Визначаємо зміну калоричних параметрів, роботу і витрачену теплоту в процесі

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 5,5 \cdot 0,66 \cdot (674 - 298) = 1365 \text{ кДж,}$$

де $c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{29,1}{44} = 0,66 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – масова ізохорна теплоємність газу

CO_2 ; $\mu c_v = 29,1 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$ – мольна ізохорна теплоємність багатоатомних газів; $\mu = 44 \text{ кг/кмоль}$ – маса 1 кмоль газу CO_2 .

Зміна ентальпії газу

$$\Delta H = M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 5,5 \cdot 0,85 \cdot (674 - 298) = 1758 \text{ кДж,}$$

де $c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{37,4}{44} = 0,85 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ – масова ізобарна теплоємність CO_2 ;

$\mu c_p = 37,4 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$ – мольна ізобарна теплоємність багатоатомних газів.

Зміна ентропії газу

$$\Delta S = M \cdot c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 5,5 \cdot 0,66 \cdot \frac{1,6-1,29}{1,6-1} \cdot \ln \frac{674}{298} = 1,53 \text{ кДж/К,}$$

де $k = 1,29$ – показник адіабати для багатоатомних газів.

Робота газу

$$L = M \cdot \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = 5,5 \cdot \frac{1}{1,6-1} \cdot (0,2 \cdot 10^3 \cdot 0,281 - 1,76 \cdot 10^3 \cdot 0,071) = 630 \text{ кДж}$$

Витрачена теплота

$$Q = M \cdot c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = 5,5 \cdot 0,66 \cdot \frac{1,6-1,29}{1,6-1} \cdot (674 - 298) = 705 \text{ кДж.}$$

Будуємо графіки політропного процесу

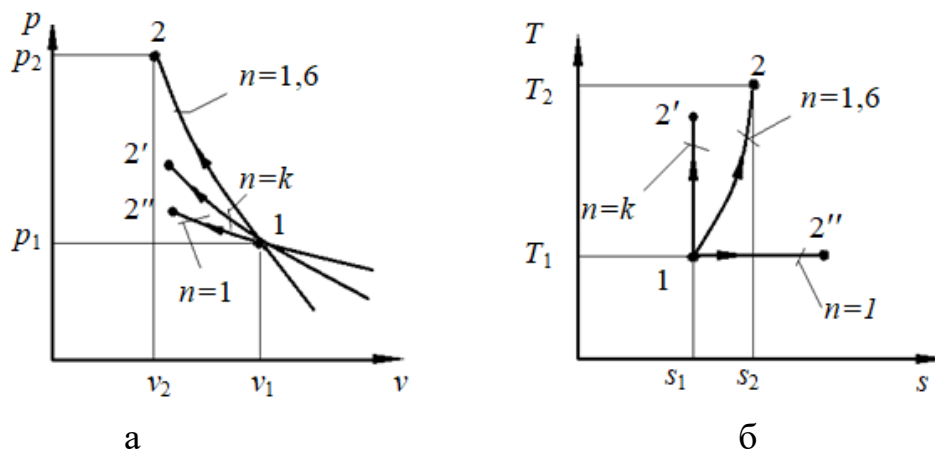


Рисунок 5.19 – Графіки політропного процесу
а – в p - v координатах; б – в T - s координатах

5.4.35. На стиск $M = 5$ кг метану в політропному процесі затрачено $L = 1500$ кДж роботи, при цьому внутрішня енергія зросла на 1100 кДж. Визначити знак і кількість теплоти в цьому процесі, знайти кінцеву температуру газу і показник політропи, якщо початкова температура газу 27°C . Вважати, що теплоємність не залежить від температури.

Розв'язання

Кількість теплоти процесу визначаємо з першого закону термодинаміки

$$Q = \Delta U + L = 1100 + (-1500) = -400 \text{ кДж.}$$

Кінцеву температуру метану визначаємо з рівняння

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1), \text{ кДж,}$$

де $c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{29,1}{16} = 1,82$ кДж/(кг·К) – масова ізохорна теплоємність метану,

$$\text{звідки } T_2 = \frac{\Delta U}{M \cdot c_v} + T_1 = \frac{1100}{5 \cdot 1,82} + 300 = 421 \text{ К.}$$

Показник політропи визначаємо з рівняння $L = \frac{M \cdot R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2)$, звідки

$$n = \frac{M \cdot R}{L} \cdot (T_1 - T_2) + 1 = \frac{5 \cdot 0,5196}{-1500} \cdot (300 - 421) + 1 = 1,21,$$

де $R = 519,6$ Дж/(кг·К) – газова стала метану.

5.5. Задачі

5.5.1. У закритій посудині об'ємом V_2 утримується газ, тиск якого p_2 , а температура t_2 . Визначити величину кінцевого тиску, зміну калоричних параметрів, кількість відведеної теплоти, за умови, що температура газу знизилась до t_1 . Побудувати графіки цього процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.2. До якої температури потрібно охолодити газ об'ємом V_2 м³, що має початковий тиск p_2 і температуру t_2 , щоб тиск при сталому об'ємі знизився до p_1 . Яку кількість теплоти потрібно для цього відвести? Допустити, що теплоємність газу стала. Побудувати процес у p - v і T - s -координатах.

5.5.3. Посудина об'ємом V_1 містить газ при тиску p_1 і температурі t_1 . Визначити кількість тепла, яку необхідно витратити для підвищення тиску газу, якщо $V = \text{const}$, до p_2 . Допустити, що залежність теплоємності від температури нелінійна. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.4. В установці повітряного опалення зовнішнє повітря, температура якого дорівнює t_1 , нагрівається в калорифері, якщо $p = \text{const}$, до температури t_2 . Визначити зміну калоричних параметрів повітря, кількість тепла, необхідну для нагрівання зовнішнього повітря об'ємом V_1 м³. Допустити, що теплоємність повітря стала, а тиск повітря дорівнює B . Побудувати графіки процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.5. Газ об'ємом V_1 із початковою температурою t_1 розширюється при сталому тиску до об'єму V_2 внаслідок впливу на нього тепла Q . Визначити

кінцеву температуру, тиск газу в процесі нагрівання і роботу розширення. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.6. До газу об'ємом V_1 м³, що міститься в циліндрі з навантаженим поршнем, який рухається вільно, при сталому тиску підводиться тепло Q . Об'єм газу при цьому збільшується до V_2 . Початкова температура газу дорівнює t_1 . Яка температура встановлюється в циліндрі і чому дорівнює робота розширення? Визначити зміну калоричних параметрів. Допустити, що залежність теплоємності газу від температури лінійна. Виконати графічну інтерпретацію процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.7. Газ об'ємом V_1 , що міститься в циліндрі діаметром D , має початкову температуру t_1 , підігрівається при сталому тиску p_1 до температури t_2 . Визначити зміну калоричних параметрів, обчислити роботу розширення, переміщення поршня і кількість затраченого при цьому тепла, вважаючи, що залежність теплоємності від температури лінійна. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.8. Газ масою M кг при абсолютному тиску p_1 і температурі t_1 стискується ізотермічно, внаслідок цього його об'єм зменшується в ε разів. Визначити початковий і кінцевий об'єми газу, кількість відведеного тепла, роботу стиску та зміну внутрішньої енергії. Виконати графічну інтерпретацію процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.9. Газ об'ємом V_1 при абсолютному тиску p_1 і початковій температурі t_1 стискується ізотермічно до абсолютного тиску p_2 . Визначити температуру та об'єм газу наприкінці процесу, обчислити роботу, кількість тепла і зміну внутрішньої енергії. Побудувати графік процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.10. Визначити кількість тепла і роботу ізотермічного процесу зміни стану газу масою M кг, початкова температура якого t_1 , об'єм V_1 і кінцевий тиск p_2 . Побудувати графіки процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.11. Газ об'ємом V_2 м³, тиск якого дорівнює p_2 , температура t_2 , стискується ізотермічно, при цьому від нього відводиться тепло Q . Визначити кінцевий об'єм, кінцевий тиск і витрачену в цьому процесі роботу. Побудувати графіки процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.12. Об'єм повітря внаслідок адіабатного стиснення в циліндрі дизеля зменшується в ε разів. Температура повітря перед початком процесу становить t_1 , а початковий абсолютний тиск p_1 . Визначити температуру і тиск повітря після стиснення, зміну його внутрішньої енергії та роботу, витрачену на цей процес. Зобразити процес в p - v і T - s -координатах.

5.5.13. Газ масою M кг, тиск якого дорівнює p_1 , а температура t_1 стискується адіабатно в циліндрі компресора до абсолютного тиску p_2 . Визначити кінцеву температуру стиснутого газу, зміну його внутрішньої енергії, ентальпію, роботу стиснення і тепло. Виконати графічну інтерпретацію процесу в p - v і T - s -координатах.

5.5.14. Унаслідок адіабатичного розширення газу масою M кг температура зменшилася в d разів, кінцевий тиск став дорівнювати p_1 , а кінцевий об'єм V_2 .

Визначити зміну калоричних параметрів, обчислити роботу і тепло процесу, побудувавши його графіки в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.15. Газ об'ємом V м³, температура якого дорівнює t_2 і тиск p_2 , розширюється адіабатично в ε разів. Визначити кінцеві параметри газу, зміну калоричних параметрів, а також отриману роботу. Побудувати графік процесу в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.16. Газ масою M кг підігрівають при сталому тиску доти, поки його об'єм не збільшиться до V_2 . Після цього газ стискується ізотермічно до початкового об'єму V_1 . Визначити сумарну роботу і тепло описаних процесів, коли відомо, що початкова температура газу в ізобарному процесі становить t_1 . Побудувати графіки процесів в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.17. Газ масою M кг, початковий тиск якого дорівнює p_2 , а температура t_2 розширюється адіабатично, унаслідок чого порівняно з початковим значенням тиск зменшується в λ разів. Після цього газ піддається ізохорному охолодженню до тиску p_3 . Визначити відсутні параметри на початку і наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, ентальпію та ентропію, роботу і кількість тепла, враховуючи, що залежність теплоємності від температури лінійна. Зобразити графіки процесу в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.18. Газ масою M кг, початковий тиск якого дорівнює p_1 , а температура t_1 , нагрівається ізохорно, унаслідок чого його тиск підвищується у λ разів. Після цього газ ізобарно охолоджується до початкової температури. Визначити відсутні параметри стану газу на початку і в кінці кожного процесу, зміну калоричних параметрів, обчислити роботу і кількість тепла, враховуючи, що залежність теплоємності від температури лінійна. Зобразити графіки процесів в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.19. Газ об'ємом V_1 , початковий тиск якого становить p_1 , а температура t_1 , розширюється ізотермічно до об'єму V_2 , після чого адіабатично стискується до початкового об'єму. Визначити відсутні параметри стану газу на початку і наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, розрахувати ентальпію, роботу й кількість тепла, враховуючи, що залежність теплоємності від температури нелінійна.

5.5.20. Газ у турбокомпресорі стискується так, що його тиск збільшується в λ разів. Показник політропного процесу при цьому дорівнює n . Обчислити роботу і кількість тепла, витраченого на цей процес, зміну калоричних параметрів, якщо відомі початкові параметри: температура t_1 і тиск p_1 . Побудувати графіки процесу в $p-v$ і $T-s$ -координатах, а також графіки процесів, якщо $n = \kappa$ і $n = \infty$.

5.5.21. Газ об'ємом V_1 , абсолютний тиск якого дорівнює p_1 , а початкова температура t_1 , стискується політропно до абсолютного тиску p_2 . Показник політропного стиснення n . Визначити температуру, об'єм газу наприкінці стиснення, обчислити роботу, витрачену на цей процес, кількість тепла і зміну калоричних параметрів. Зобразити графіки процесу в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.22. У політропному стисненні з показником n при зміні стану газу масою M кг його об'єм зменшується в ε разів. Початковий тиск газу становить

p_1 , температура t_1 . Обчислити роботу і кількість тепла, витраченого в цьому процесі, зміну калоричних параметрів, а також кінцевий тиск і температуру газу. Побудувати графіки процесу в $p-v$ і $T-s$ -координатах, а також графіки процесів, що починаються в одній і тій самій точці, якщо $n = \kappa$ і $n = 1$.

5.5.23. Газ об'ємом V_1 , який має початкові параметри: тиск p_2 і температуру t_2 , розширюється політропно до тиску p_1 . Об'єм газу змінюється до величини V_2 . Визначити показник політропного стиснення, кінцеву температуру, обчислити роботу, кількість підведеного тепла і зміну калоричних параметрів. Зобразити графік процесу в $p-v$ і $T-s$ -координатах.

5.5.24. В поршневому компресорі стискується повітря, початкові параметри якого такі: $p_1 = 1$ бар, температура t_1 . Процес стиску політропний с показником політропи n . Визначити відсутні параметри повітря на початку і в кінці стиску, роботу стиску для 1 кг повітря, кількість відведеного тепла. Тиск повітря на виході з компресора дорівнює $p_2 = 7$ бар. Зобразити політропний процес в $T-s$ координатах.

5.5.25. Об'єм повітря внаслідок адіабатного стиснення в циліндрі дизеля зменшується в $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 5$ разів. Температура повітря перед початком процесу становить t_1 , а початковий абсолютний тиск p_1 . Визначити температуру і тиск повітря після стиснення, зміну його внутрішньої енергії та роботу, затрачену на цей процес.

5.5.26. Внаслідок адіабатного розширення газу N_2 масою M температура його зменшилася в $d = \frac{T_1}{T_2}$ разів, а кінцевий тиск став дорівнювати $p_2 = 0,8$ МПа, а кінцевий об'єм – V_2 . Визначити зміну калоричних параметрів, обчислити роботу і тепло процесу.

5.5.27. Повітря масою M при температурі t_1 ізотермічно стискуються до тиску p_2 . На стиск витрачається робота $L_{1-2} = -15$ МДж. Знайти початковий тиск і об'єм, кінцевий об'єм і тепло, яке відводиться від метану.

6. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ

Викладено короткі теоретичні відомості про термодинамічні цикли як сукупність почергово здійснених процесів розширення та стиснення робочого тіла; прямий термодинамічний цикл – умови виконання, призначення, оцінку ефективності; зворотний термодинамічний цикл – його сенс, оцінку ефективності циклів холодильних машин і теплових насосів; сутність другого закону термодинаміки.

Мета – сформулювати знання про особливості перетворення теплоти на роботу та умови роботи теплових двигунів, про сутність другого закону термодинаміки та принцип зростання ентропії ізольованої термодинамічної системи.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- пояснити, в яких умовах може відбуватись цикл Карно і чому його вважають еталоном для порівняння ефективності циклів проєктованих і діючих теплових двигунів;
- розрахувати виконану за один цикл роботу, кількість підведеної та відведеної теплоти;
- розраховувати термічний ККД.

6.1. Короткі теоретичні відомості

6.1.1. Поняття про термодинамічний цикл

Термодинамічним циклом називається сукупність термодинамічних процесів, в результаті послідовного здійснення яких робоче тіло повертається в початковий стан.

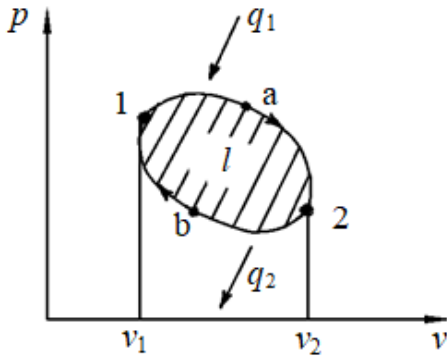
Цикл, в якому одержана додатна робота, називається прямим; в ньому робота розширення l_1 , більше роботи стиску l_2 . Такі цикли здійснюються за годинниковою стрілкою. (рис. 6.1). Робота розширення зображується площиною $l_1 = \text{пл.}1a2v_2v_11$, робота стиску площею $l_2 = \text{пл.}2b1v_2v_22$. Таким чином, додатна робота в прямому циклі, графічно зображується в $p-v$ координатах площиною, що знаходиться всередині замкнутого контуру циклу і дорівнює: $l = l_1 - l_2$.

Якщо позначити через q_1 – кількість тепла, підведеного до 1 кг робочого тіла, а через q_2 – кількість тепла, відведеного від 1 кг робочого тіла, то корисно використане тепло в циклі дорівнюватиме

$$q = q_1 - q_2.$$

В ідеальному прямому циклі корисне використане тепло q витрачається на одержання додатної роботи l , тобто

$$l = q = q_1 - q_2.$$



Рисунки 6.1 – Прямий довільний цикл

Рисунки 6.2 – Зворотний довільний цикл

Ступінь досконалості перетворення тепла в роботу в термодинамічному прямому циклі оцінюється термічним коефіцієнтом корисної дії (ККД). Термічним ККД прямого циклу називається відношення додатної роботи за цикл, до тепла q_1 , що підведена до робочого тіла в цьому циклі від зовнішніх джерел

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \quad (6.1)$$

Термічний ККД показує, яку кількість одержуваного тепла машина перетворює в роботу в конкретних умовах проходження ідеального циклу. Чим більше величина η_t , тим досконаліше і цикл і теплова машина.

Отже, машини, що працюють за прямим циклом, є теплові двигуни (двигуни внутрішнього згорання, газотурбінні установки, паросилові установки, реактивні двигуни).

Цикл, в якому робота стиску більш від роботи розширення, називається зворотним. Такий цикл відбувається проти ходу годинникової стрілки (рис. 6.2). При цьому тепло відбирається від холодного джерела тепла і передається гарячому джерелу. Гарячому джерелу передається тепло q_1 , що дорівнює сумі тепла q_2 , яке забирається від холодного джерела і тепла еквівалентного підведеної у циклі роботи l , тобто

$$q_1 = q_2 + l.$$

Таким чином, при затраті зовні роботи, тепло перетікатиме від холодного джерела до гарячого.

Ступінь досконалості зворотного циклу визначається холодильним коефіцієнтом ε . Холодильний коефіцієнт циклу являє собою відношення кількості тепла q_2 , відведеного в зворотному циклі від охолоджувача до роботи l , затраченої у цьому циклі

$$\varepsilon = \frac{q}{l} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}.$$

Отже, машини, що працюють за зворотним циклом (проти годинникової стрілки) є холодильними машинами, або тепловими насосами. Приклади розрахунку циклів холодильних установок і компресорів наведені в роботі [8].

Дослідження роботи реальних теплових машин, наприклад двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) робиться по діаграмам, в яких дається зміна тиску в циліндрі залежності від положення поршня за весь цикл. Таку діаграму, знятою за допомогою спеціального приладу-індикатора, називають індикаторною діаграмою. Площа замкнутої фігури індикаторної діаграми зображує в означеному масштабі індикаторну роботу газу l за один цикл.

На рис. 6.3 зображена індикаторна діаграма чотиритактного двигуна, який працює на легкому паливі-бензині. Такий робочий процес (цикл) ДВЗ здійснюється за чотири хода поршня (такту) або за два оберти валу. у такому робочому процесі реального двигуна є всі ознаки необоротних термодинамічних процесів: тертя, кінцеві швидкості поршня, теплообмін при кінцевій різності температур та інші. Аналізувати такий цикл з точки зору теплових процесів неможливо, тому в термодинаміці досліджують не реальні процеси теплових двигунів, а ідеальні оборотні цикли. В якості робочого тіла приймають ідеальний газ зі сталою теплоємністю. Циліндр заповнюється сталою кількістю робочого тіла. Підведення теплоти до робочого тіла здійснюється від зовнішніх джерел теплоти, а ні за рахунок спалювання палива. Реальні процеси циклу замінюються ідеальними термодинамічними процесами, які були розглянуті в розділі 5. В таких циклах ДВЗ такти всмоктування 0-1 і вихлопу 4-0 не зображуються. Діаграма яка будується при вказаних умовах, є не індикаторною діаграмою, а в $p-v$ або $T-s$ координатах теоретичним циклом з підводом теплоти у зазначених термодинамічних процесах.

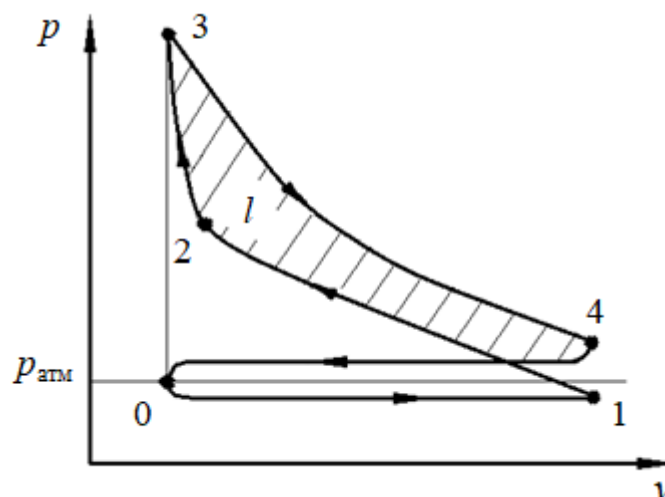


Рисунок 6.3 – Зображення індикаторної діаграми чотиритактного двигуна внутрішнього згорання

Таким чином, вивчення ідеальних термодинамічних циклів, дозволяє робити при прийнятих припущеннях аналіз і порівняння роботи різних двигунів і виявляти фактори, які впливають на їх економічність [7-9].

Теоретичні цикли теплових двигунів будуть розглянуті нижче.

6.1.2. Цикл Карно

Цикл Карно складається з двох ізотермічних процесів 1-2 розширення і 3-4 стиску, і двох адіабатних процесів 2-3 розширення і 4-1 стиску (рис. 6.4).

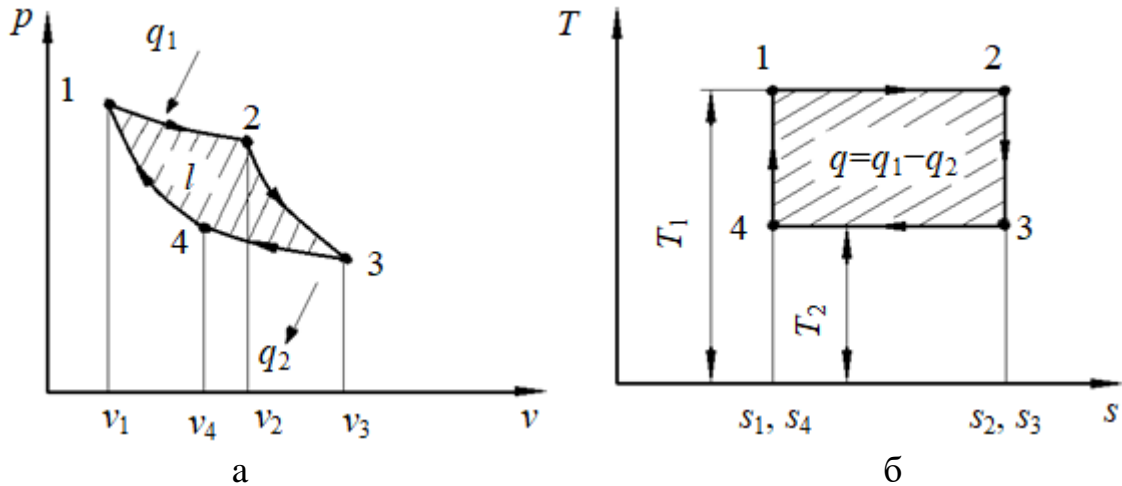


Рисунок 6.4 – Цикл Карно в p - v (а) або T - s координатах (б)

Кількість підведеного тепла

$$q_1 = R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (6.3)$$

Кількість відведеного тепла

$$q_2 = R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{v_3}{v_4}. \quad (6.4)$$

Робота циклу Карно

$$l = q_1 - q_2. \quad (6.5)$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_i = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (6.6)$$

де T_1 і T_2 – відповідно температури верхнього і нижнього джерела теплоти в К.

6.1.3. Теоретичні цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання

Цикл з підведенням тепла при сталому об'ємі складається з двох адіабат і двох ізохор (рис. 6.5)

Характеристиками циклу є

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} - \text{ступінь стиску};$$

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} - \text{ступінь підвищення тиску.}$$

Кількість підведеного тепла

$$q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2).$$

Кількість відведеного тепла

$$q_2 = c_v \cdot (T_1 - T_4).$$

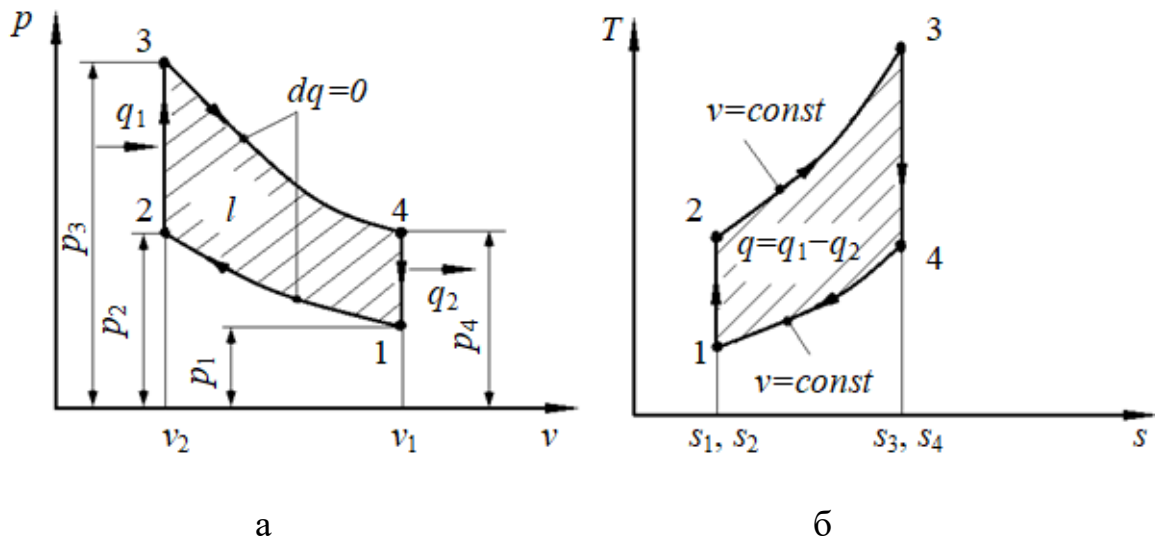


Рисунок 6.5 – Цикл ДВЗ ($v = \text{const}$) в p - v (а) або T - s координатах (б)

Робота циклу

$$l = q_1 - q_2. \quad (6.7)$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (6.8)$$

Цикл з підведенням тепла при сталому тиску складається з двох адіабат, однієї ізобари і однієї ізохори (рис. 6.6).

Характеристиками циклу є

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} - \text{ступінь стиску};$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} - \text{ступінь попереднього розширення.}$$

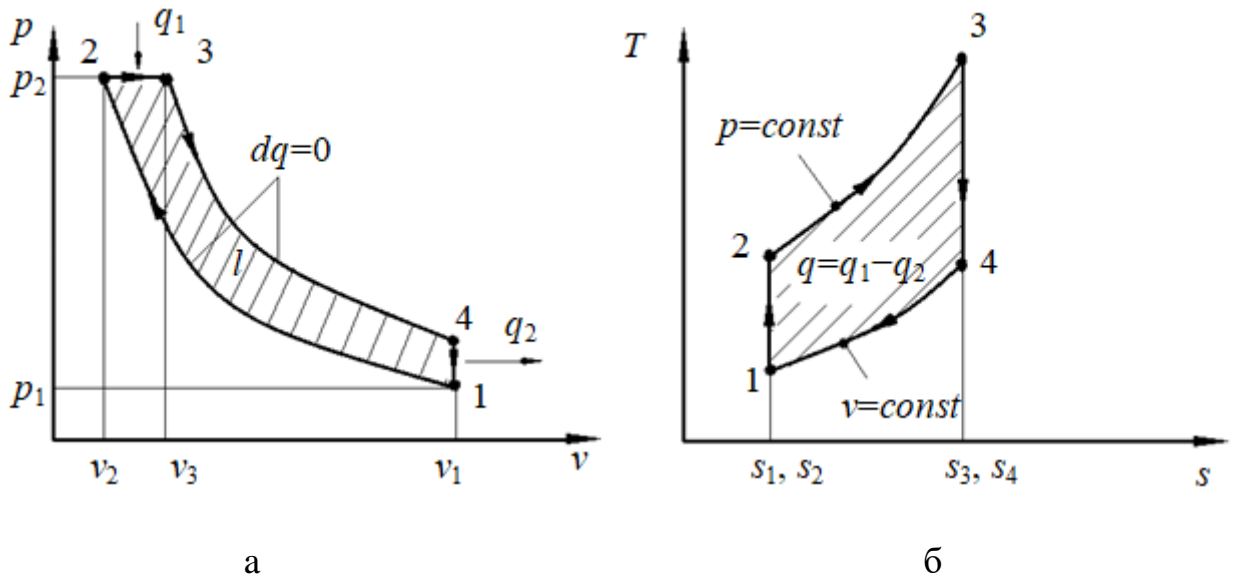


Рисунок 6.6 – Цикл ДВЗ ($p = \text{const}$) в p - v (а) або T - s координатах (б)

Кількість підведеного тепла

$$q_1 = c_p \cdot (T_3 - T_2).$$

Кількість відведеного тепла (абсолютне значення)

$$q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1).$$

Робота циклу

$$l = q_1 - q_2.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^{k-1}}{k \cdot (\rho - 1)}. \quad (6.9)$$

Цикл з комбінованим підведенням тепла складається з двох адіабат, двох ізохор і однієї ізобари (рис. 6.7).

Характеристиками циклу є

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}; \quad \lambda = \frac{p_3}{p_2}; \quad \rho = \frac{v_4}{v_3}.$$

Кількість підведеного тепла

$$q_1 = q_1' + q_1'' = c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p \cdot (T_4 - T_3).$$

Кількість відведеного тепла

$$q_2 = c_v \cdot (T_1 - T_5).$$

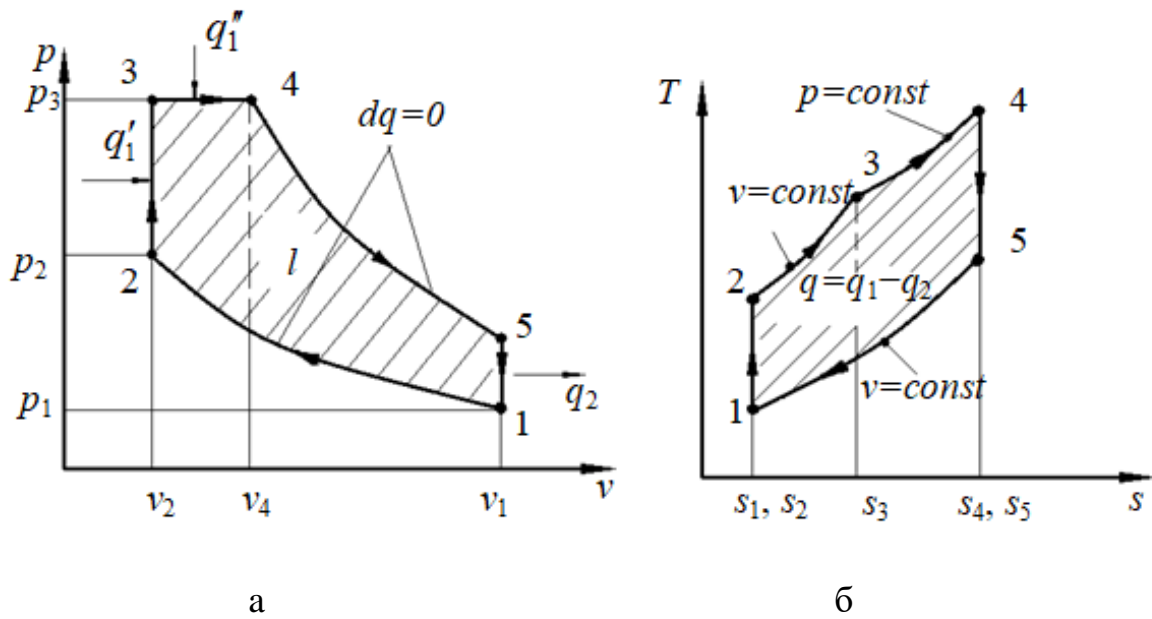


Рисунок 6.7 – Цикл ДВЗ ($v, p = \text{const}$) в p - v (а) або T - s координатах (б)

Термічний ККД. циклу

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}. \quad (6.10)$$

У наведених вище теоретичних циклах поршневих двигунів внутрішнього згорання рівняння для визначення кількості підведеного і відведеного тепла, а також для термічного ККД дані для випадку $c = \text{const}$.

6.1.4. Цикли газотурбінних установок (ГТУ)

На рис. 6.8 наведена схема найпоширенішого типу газотурбінної установки зі згоранням палива при сталому тиску. Компресор K , розташований на спільному валу з газовою турбіною T , всмоктує повітря з атмосфери і стискує його до заданого тиску. Стиснуте в компресорі повітря надходить в камеру згорання $KЗ$; туди ж паливним насосом $ПН$ подається рідке паливо. Займання горючої суміші відбувається від запальника $З$ (електричної свічки). Згорання відбувається при сталому стиску. З камери згорання гази надходять в сопла $С$, з яких вони з великою швидкістю поступають на робочі лопатки $Л$ турбіни і приводять до обертання її ротора. Відпрацьовані гази через випускний патрубок $П$ випускають в атмосферу.

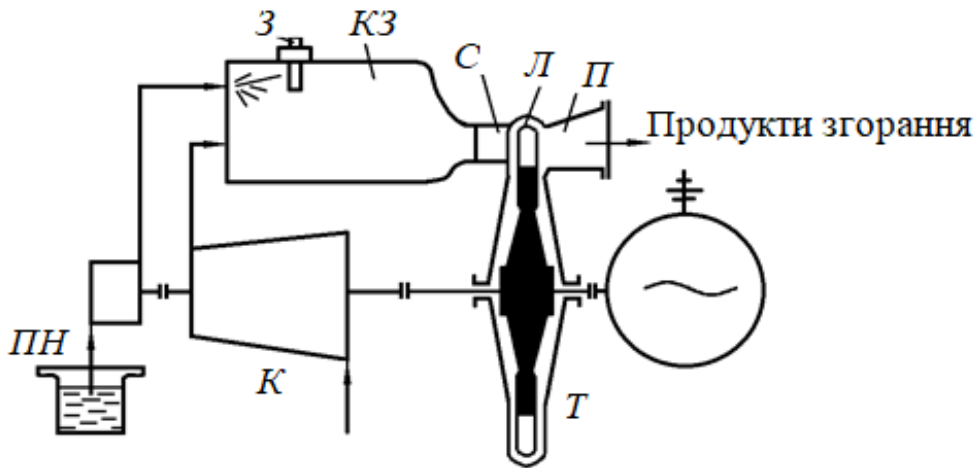


Рисунок 6.8 – Схема ГТУ з підводом теплоти при $p = \text{const}$

На рис. 6.9. зображений теоретичний цикл газової турбіни з підведенням тепла при сталому тиску. Як видно з цього рисунка, цикл складається з двох адіабат і двох ізобар. Лінія 1-2 зображує процес адіабатного стиску в компресорі, 2-3 – ізобарне підведення тепла (згорання палива), 3-4 – адіабатне розширення в газовій турбіні, 4-1 – умовний ізобарний процес, що замикає цикл.

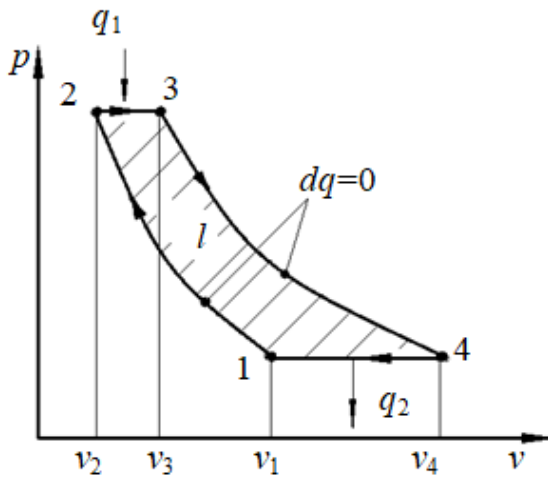


Рисунок 6.9 – Цикл ГТУ з підводом теплоти при $p = \text{const}$

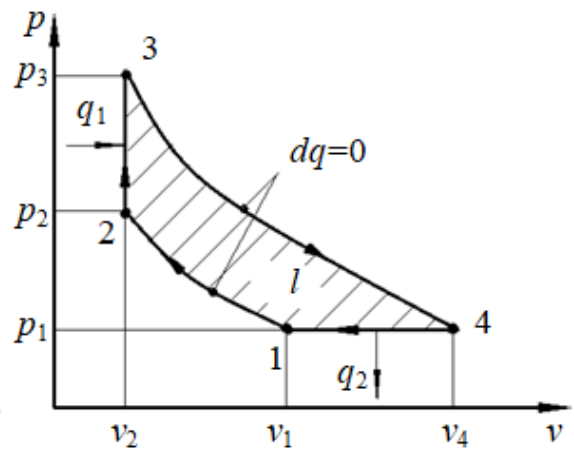


Рисунок 6.10 – Цикл ГТУ з підводом теплоти при $v = \text{const}$

Термічний ККД циклу

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad \text{або} \quad \eta_T = 1 - \frac{1}{\lambda^k},$$

де $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ – ступінь стиску, а $\lambda = \frac{p_2}{p_1}$ – ступінь підвищення тиску.

Цикл газотурбінної установки з підведенням тепла при сталому об'ємі представлений на рис. 6.10, а схема установки наведена на рис. 6.11.

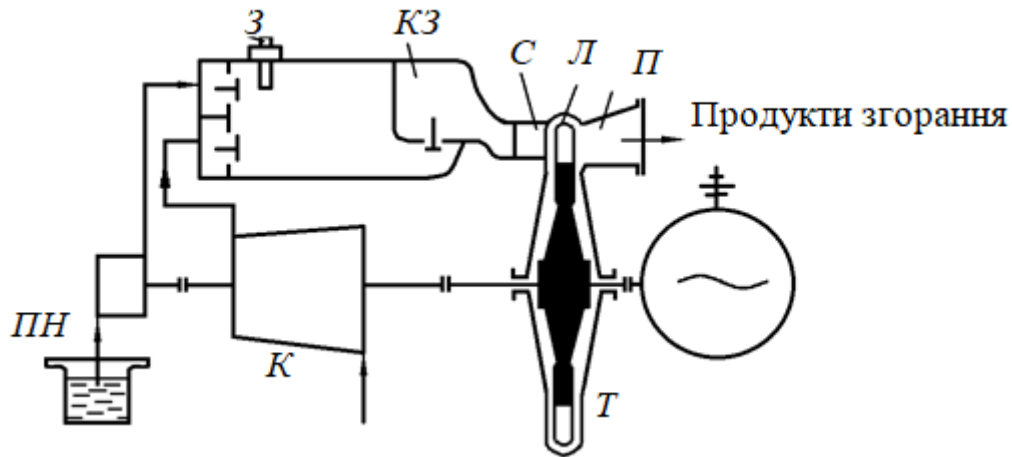


Рисунок 6.11 – Схема ГТУ з підводом теплоти при $v = \text{const}$

В компресорі K відбувається адіабатний стиск повітря (лінія 1-2, рис. 6.10). Стиснуте повітря надходить в камеру згорання $KЗ$, куди одночасно паливним насосом $ПН$ подається рідке паливо. При згоранні об'єм не змінюється (при закритих клапанах). Займання горючої суміші відбувається від запальника $З$. Продукти згорання проходять через випускний клапан камери, надходять в сопла $С$, де адіабатно розширюються (лінія 3-4, рис. 6.10). Далі гази з великою швидкістю надходять на робочі лопатки $Л$ турбіни і приводять до обертання її ротор. Відпрацьовані гази через випускний патрубок $П$ випускають в атмосферу. Цикл замикається умовним ізобарним процесом (лінія 4-1, рис. 6.10).

Термічний ККД. циклу

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}, \quad (6.11)$$

де $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$.

6.2. Методичні рекомендації до розв'язування задач

При вивченні цієї теми студент повинен добре розібратися в тлумаченні другого закону термодинаміки та ознайомитись з умовами безперервного перетворення теплоти в роботу, пояснити, в яких умовах може відбуватись цикл Карно і чому його вважають еталоном для порівняння ефективності циклів проєктованих і діючих теплових двигунів.

Необхідно усвідомити, які цикли відбуваються у двигунах внутрішнього згорання і газотурбінних установках, навчитись розрахувати виконану за один цикл роботу, кількість підведеної та відведеної теплоти, а також термічний ККД. Вихідні дані для самостійного розв'язування задач наведені в табл. 6.3.

6.3. Питання для самоконтролю

- 6.3.1. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
- 6.3.2. Що називається термодинамічним циклом?
- 6.3.3. Який цикл називається прямим, а який зворотним?
- 6.3.4. Дайте визначення термічного ККД циклу?
- 6.3.5. Назвіть теплові двигуни, що працюють за прямим циклом.
- 6.3.6. У яких установках застосовується зворотний цикл і чим характеризується його ефективність?
- 6.3.7. Чи може термічний ККД дорівнювати одиниці?
- 6.3.8. Як можна пояснити термін "вічний двигун другого роду"?
- 6.3.9. Чому для теплового двигуна обов'язково потрібен охолодник?
- 6.3.10. Які основні фактори зумовлюють величину термічного ККД?
- 6.3.11. У чому, з погляду термодинаміки, полягає принципова відмінність парового двигуна від двигуна внутрішнього згоряння?
- 6.3.12. Які теоретичні цикли відбуваються в поршневих двигунах внутрішнього згоряння?

6.4. Приклади розв'язування задач

6.4.1. В енергетичній установці робоче тіло, яке володіє властивостями газу CO_2 , і має початкові параметри: абсолютний тиск $p_1 = 3,8$ бар і температуру $t_1 = 267$ °С, ізобарно охолоджується до температури $t_2 = 27$ °С. Потім нагрівом газу при сталому об'ємі тиск зростає в три рази, послідовним політропним розширенням газ повертається в вихідний стан.

Визначити:

- параметри у характерних точках циклу;
- для кожного процесу і всього циклу зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, роботу і теплоту;
- середню температуру підвода і відводу теплоти в циклі;
- термічний ККД циклу.

Побудувати цикл в $p-v$ і $T-s$ координатах.

Скласти зведену таблицю розрахунків циклу:

- параметрів у характерних точках циклу;
- зміну калоричних параметрів;
- теплоти і роботи.

Розв'язання

Визначаємо параметри стану газу CO_2 в характерних точках циклу.

Газова стала CO_2

$$R = \frac{8314}{44} = 189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $\mu = 44$ кг/кмоль – молярна маса CO_2 .

Точка 1. $p_1 = 3,8$ бар = $3,8 \cdot 10^5$ Па; $T_1 = t_1 + 273 = 267 + 273 = 540$ К.

З рівняння ідеального газу знаходимо v_1

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{189 \cdot 540}{3,8 \cdot 10^5} = 0,268 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2. $T = t_2 + 273 = 27 + 273 = 300\text{К}$; $p_2 = p_1 = 3,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Користуючись рівнянням ізобари, знаходимо питомий об'єм v_2

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2}, v_2 = \frac{T_2 \cdot v_1}{T_1} = \frac{300 \cdot 0,268}{540} = 0,149 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3. $v_3 = v_2 = 0,149 \text{ м}^3/\text{кг}$; $p_3 = 3 \cdot p_2 = 3 \cdot 3,8 \cdot 10^5 = 11,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Користуючись рівнянням ізохори, знайдемо температуру T_3

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = 3, T_3 = 3 \cdot T_2 = 3 \cdot 300 = 900\text{К}.$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів теплоту і роботу процесів циклу.

Знаходимо теплоємності газу, вважаючи їх сталими

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{37,4}{44} = 0,85 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ – масова ізобарна теплоємність,}$$

де $\mu c_p = 37,4 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність триатомного газу.

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 0,85 - 0,189 = 0,661 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Ізобарний процес 1-2

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,661 \cdot (300 - 540) = -158,6 \text{ кДж}/\text{кг},$$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 0,85 \cdot (300 - 540) = -204 \text{ кДж}/\text{кг},$$

Зміна ентропії газу

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,85 \cdot \ln \frac{300}{540} = -0,5 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

Кількість теплоти, яка приймає участь в процесі,

$$q = \Delta h = -204 \text{ кДж}/\text{кг},$$

Робота газу

$$l = R \cdot (T_2 - T_1) = 0,189 \cdot (300 - 540) = -45,4 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Ізохорний процес 2-3

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,661 \cdot (900 - 300) = 396,6 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 0,85 \cdot (900 - 300) = 510 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,661 \cdot \ln \frac{900}{300} = 0,726 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$q = \Delta u = 396,6 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$l = 0.$$

Політропний процес 3-1

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_3) = 0,661 \cdot (540 - 900) = -238 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_3) = 0,85 \cdot (540 - 900) = -306 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_3} + R \cdot \ln \frac{v_1}{v_3} = 0,661 \cdot \ln \frac{540}{900} + 0,189 \cdot \ln \frac{0,268}{0,149} = -0,226 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Кількість теплоти, яка приймає участь в процесі

$$q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_1 - T_3),$$

де n – показник політропи визначається з виразу

$$n = \frac{\ln \frac{p_3}{p_1}}{\ln \frac{v_1}{v_3}} = \frac{\ln \frac{11,4 \cdot 10^5}{3,8 \cdot 10^5}}{\ln \frac{0,268}{0,149}} = 1,87;$$

$k = 1,29$ – показник адіабати для три атомних газів (див. табл. 4.2)

$$q = 0,661 \cdot \frac{1,87 - 1,29}{1,87 - 1} \cdot (540 - 900) = -158,6 \text{ кДж/кг},$$

$$l = \frac{R}{n-1} \cdot (T_3 - T_1) = 78,2 \text{ кДж/кг}.$$

Характеристика циклу

Кількість теплоти за цикл

$$q_{\text{ц}} = \sum_1^n q_i = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-1} = -204 + 396,6 - 158,6 = 33,4 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість роботи за цикл

$$l_{\text{ц}} = \sum_1^n l_i = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-1} = -45,4 + 0 + 78,2 = 32,8 \text{ кДж/кг}.$$

$q_{\text{ц}} \approx l_{\text{ц}}$, що підтверджує правильність розрахунків.

Кількість підведеної теплоти за цикл

$$q_1 = q_{2-3} = 396,6 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість відведеної теплоти за цикл

$$q_2 = q_2' + q_2'' = q_{1-2} + q_{3-1} = -204 + (-158,6) = -362,6 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{Термічний ККД циклу } \eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{362,6}{396,6} = 0,085.$$

Зміна калоричних характеристик за цикл

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-1} = -158,6 + 396,6 - 238 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-1} = -204 + 510 - 306 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-1} = -0,5 + 0,726 - 0,226 = 0.$$

Середня температура підвода теплоти за цикл

$$T_{1cp} = \frac{q_{2-3}}{\Delta s_{2-3}} = \frac{39,6}{0,726} = 546 \text{ К.}$$

Середня температура відводу теплоти за цикл

$$T_{2cp} = \frac{q_{1-2} + q_{3-1}}{\Delta s_{1-2} + \Delta s_{3-1}} = \frac{-362,6}{-0,726} = 499,4 \text{ К.}$$

Термічний ККД циклу також можливо розрахувати за формулою

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{2cp}}{T_{1cp}} = 1 - \frac{499,4}{546} = 0,085.$$

Результати розрахунків параметрів газу і калоричних характеристик термодинамічних процесів циклу надамо в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Точка	v , м ³ /кг	p , МПа	T , К	Процес	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , кДж/(кг·К)	q , кДж/кг	l , кДж/кг
1	0,268	0,38	540	1-2	-159	-204	-0,5	-204	-45,4
2	0,149	0,38	300	2-3	397	510	0,726	397	0
3	0,149	1,14	900	3-1	-238	-306	-0,226	-159	78,2

Будуємо якісно цикл в $p-v$ і $T-s$ координатах.

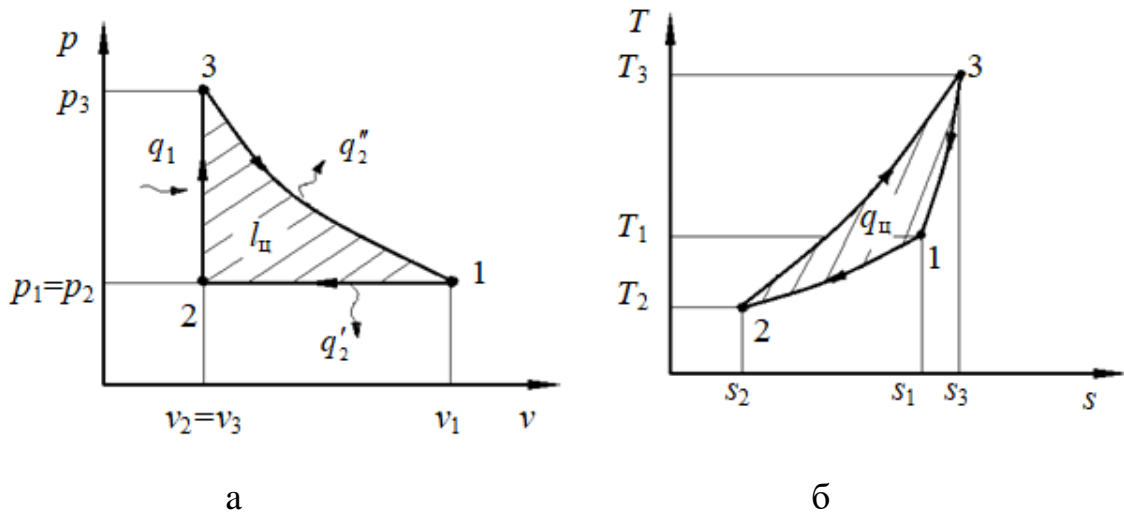


Рисунок 6.12 – Цикл енергетичної установки:
а – в $p-v$ координатах; б – в $T-s$ координатах

6.4.2. Теплоенергетична установка працює по прямому циклу і має в якості робочого тіла газ CH_4 . Початкові параметри циклу: надлишковий тиск $p_{1н} = 0,8$ МПа, температура $t_1 = 47$ °С. Газ ізобарно нагрівається до температури $t_2 = 377$ °С, потім при політропному розширенні з показником політропи $n = 1,75$ температура газу знижується до початкової, а послідуочим ізотермічним стиском газ повертається в вихідний стан. Вважати, що теплоємність газу в циклі не залежить від температури, а тиск навколишнього середовища дорівнює $B = 750$ мм рт. ст.

Розрахунками визначити:

- параметри у характерних точках циклу;
- для кожного процесу і всього циклу зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, роботу і теплоту;
- середню температуру підвода і відводу теплоти в циклі;
- термічний ККД циклу.

Побудувати цикл в $p-v$ і $T-s$ координатах.

Скласти зведену таблицю результатів розрахунків циклу:

- параметрів у характерних точках циклу;
- зміну калоричних параметрів;
- теплоти і роботи.

Розв'язання

Визначаємо параметри стану газу CH_4 в характерних точках циклу.

Газова стала CH_4

$$R = \frac{8314}{16} = 519,6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $\mu = 16$ кг/кмоль – молярна маса CH_4 .

Точка 1. Абсолютний тиск $p_1 = p_{1н} + B = 8 \cdot 10^5 + 750 \cdot 133 = 9 \cdot 10^5$ Па;
 $T_1 = t_1 + 273 = 47 + 273 = 320$ К.

З рівняння ідеального газу знаходимо v_1

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{519,6 \cdot 320}{9 \cdot 10^5} = 0,185 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2. $p_2 = p_1 = 9 \cdot 10^5$ Па; $T_2 = t_2 + 273 = 377 + 273 = 650$ К.

Користуючись рівнянням ізобари, знаходимо питомий об'єм v_2

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2}, v_2 = \frac{T_2 \cdot v_1}{T_1} = \frac{650 \cdot 0,185}{320} = 0,376 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3. $T_3 = T_1 = 320$ К. Тиск p_3 визначаємо, скориставшись рівнянням політропи

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}, p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 9 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{320}{650} \right)^{\frac{1,75}{1,75-1}} = 1,72 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Питомий об'єм v_3 обчислюємо з рівняння стану

$$v_3 = \frac{R \cdot T_3}{p_3} = \frac{519,6 \cdot 320}{1,72 \cdot 10^5} = 0,967 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Розраховуємо калоричні характеристики процесів циклу.

Обчислюємо теплоємності газу

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{37,4}{16} = 2,34 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $\mu c_p = 37,4 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність багатоатомних газів (табл. 4.2).

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 2,34 - 0,5196 = 1,82 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Ізобарний процес 1-2

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 1,82 \cdot (650 - 320) = 600 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 2,34 \cdot (650 - 320) = 772 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Зміна ентропії газу

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 2,34 \cdot \ln \frac{650}{320} = 1,66 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Кількість теплоти, яка приймає участь в процесі

$$q = \Delta h = 772 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Робота газу

$$l = R \cdot (T_2 - T_1) = 0,5196 \cdot (650 - 320) = 172 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Політропний процес 2-3

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 1,82 \cdot (320 - 650) = -600 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 2,34 \cdot (320 - 650) = -772 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} + R \cdot \ln \frac{v_3}{v_2} = 1,82 \cdot \ln \frac{320}{650} + 0,519 \cdot \ln \frac{0,967}{0,376} = -0,8 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_3 - T_2) = 1,82 \cdot \frac{1,75-1,29}{1,75-1} \cdot (320 - 650) = -369 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$l = \frac{R}{n-1} \cdot (T_2 - T_3) = \frac{0,5196}{1,75-1} \cdot (650 - 320) = 229 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Ізотермічний процес 3-1

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_1) = 0;$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_1) = 0;$$

$$\Delta s = R \cdot \ln \frac{v_1}{v_3} = 0,5196 \cdot \ln \frac{0,185}{0,967} = -0,86 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$q = l = T_3 \cdot \Delta s = 320 \cdot (-0,86) = -275 \text{ кДж}/\text{кг};$$

Зміна калоричних характеристик за цикл

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-1} = 600 - 600 + 0 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-1} = 772 - 772 + 0 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-1} = 1,66 - 0,86 - 0,86 \approx 0.$$

Кількість теплоти за цикл

$$q_{\text{ц}} = \sum_1^n q_i = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-1} = 772 - 369 - 275 = 128 \text{ кДж/кг.}$$

Кількість роботи за цикл

$$l_{\text{ц}} = \sum_1^n l_i = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-1} = 172 + 229 - 275 = 126 \text{ кДж/кг.}$$

$q_{\text{ц}} \approx l_{\text{ц}}$, що підтверджує правильність розрахунків.

Кількість підведеної теплоти за цикл

$$q_1 = q_{1-2} = 772 \text{ кДж/кг.}$$

Кількість відведеної теплоти за цикл

$$q_2 = q_2' + q_2'' = q_{2-3} + q_{3-1} = -369 + (-275) = -644 \text{ кДж/кг.}$$

$$\text{Термічний ККД циклу } \eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{644}{772} = 0,166.$$

Середня температура підвода теплоти за цикл

$$T_{1\text{cp}} = \frac{q_{1-2}}{\Delta s_{1-2}} = \frac{772}{1,66} = 465 \text{ К.}$$

Середня температура відводу теплоти за цикл

$$T_{2\text{cp}} = \frac{q_{2-3} + q_{3-1}}{\Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-1}} = \frac{-275 + (-369)}{-0,8 + (-0,86)} = 388 \text{ К.}$$

Будуємо якісно цикл в $p-v$ і $T-s$ координатах.

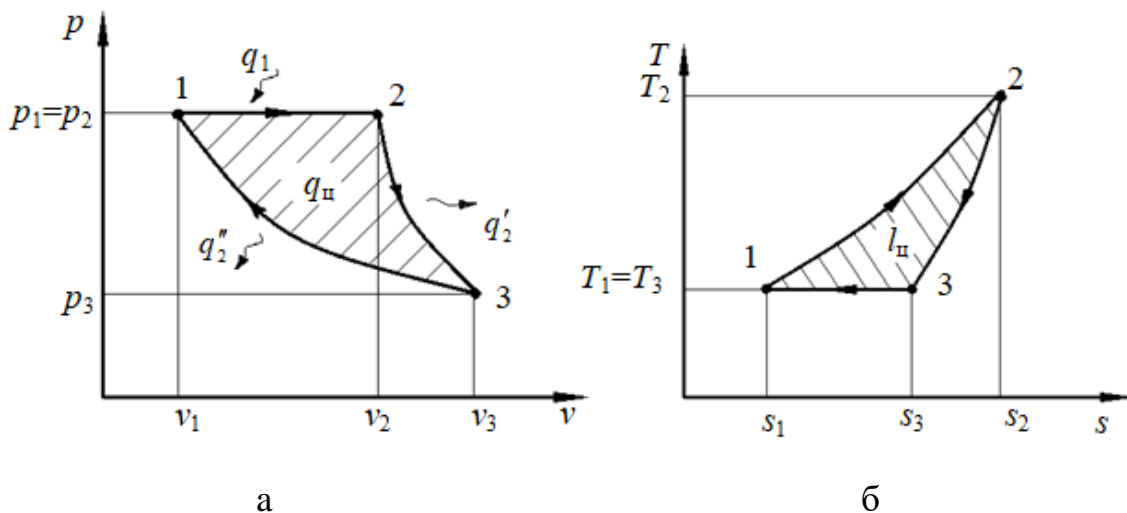


Рисунок 6.13 – Цикл енергетичної установки
а – в $p-v$ координатах; б – в $T-s$ координатах

Результати розрахунків параметрів газу і калоричних характеристик термодинамічних процесів циклу надамо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Точка	v , м ³ /кг	p , МПа	T , К	Процес	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , кДж/(кг·К)	q , кДж/кг	l , кДж/кг
1	0,185	0,9	320	1-2	600	772	1,66	772	172
2	0,376	0,9	650	2-3	-600	-772	-0,80	-369	229
3	0,967	0,17	320	3-1	0	0	-0,86	-275	-275

6.4.3. В ідеальному тепловому двигуні здійснюється цикл Карно в межах температур $t_1 = 500^\circ\text{C}$, і $t_3 = 37^\circ\text{C}$ див. рис. 6.4. В якості робочого тіла використовується газ H_2 , найвищий тиск якого дорівнює 7,5 МПа, а найнижчий – 0,15 МПа. Вважати, що теплоємність газу в циклі не залежить від температури.

Визначити параметри стану газу в характерних точках циклу, для кожного процесу і всього циклу зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, роботу, теплоту, термічний ККД, кількість підведеного і відведеного тепла.

Розв'язання

Визначаємо параметри стану газу H_2 в характерних точках циклу.

$$\text{Газова стала } \text{H}_2 \quad R = \frac{8314}{2} = 4157 \text{ Дж/(кг·К)},$$

де $\mu = 2 \text{ кг/кмоль}$ – молярна маса H_2 .

$$\text{Точка 1. } p_1 = 75 \cdot 10^5 \text{ Па; } T_1 = t_1 + 273 = 500 + 273 = 773 \text{ К.}$$

З рівняння ідеального газу знаходимо v_1

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{4157 \cdot 773}{75 \cdot 10^5} = 0,42 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\text{Точка 2. } T_1 = T_2 = 973 \text{ К.}$$

Користуючись рівнянням адіабати, визначимо тиск p_2

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки } p_2 = p_3 \cdot \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,1 \cdot \left(\frac{773}{310} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 2,69 \text{ МПа,}$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів.

$$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} = \frac{4157 \cdot 773}{2,69 \cdot 10^6} = 1,19 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\text{Точка 3. } T_3 = 310 \text{ К. } p_3 = 0,11 \text{ МПа.}$$

$$v_3 = \frac{R \cdot T_3}{p_3} = \frac{4157 \cdot 310}{0,11 \cdot 10^6} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 4. $T_4 = T_3 = 310 \text{ К}$.

Користуючись рівнянням взаємозв'язку між параметрами в адіабатному процесі 4-1, знаходимо тиск p_4 .

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки } p_4 = p_1 \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 7,5 \cdot \left(\frac{310}{773} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 0,31 \text{ МПа},$$

$$v_4 = \frac{R \cdot T_4}{p_4} = \frac{4157 \cdot 310}{0,31 \cdot 10^6} = 4,1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів, теплоту і роботу процесів циклу.

Знаходимо теплоємність газу

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{2} = 14,55 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{масова ізобарна теплоємність},$$

де $\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомного газу.

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 14,5 - 4,157 = 10,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Ізотермічний процес 3-1

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0;$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 0;$$

$$\Delta s = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = 4,157 \cdot \ln \frac{1,19}{0,42} = 4,33 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Кількість теплоти і роботи в процесі

$$q = l = T_1 \cdot \Delta s = 773 \cdot 4,33 = 3347 \text{ кДж}/\text{кг} = 3,35 \text{ МДж}/\text{кг}.$$

Адіабатний процес 2-3

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 10,4 \cdot (310 - 773) = -4815 \text{ кДж}/\text{кг} = -4,82 \text{ МДж}/\text{кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 14,55 \cdot (310 - 773) = -6737 \text{ кДж}/\text{кг} = -6,74 \text{ МДж}/\text{кг};$$

$$\Delta s = 0; q = 0;$$

$$l = -\Delta u = 4,82 \text{ МДж}/\text{кг}.$$

Ізотермічний процес 3-4

$$\Delta u = c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0;$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 0;$$

$$\Delta s = R \cdot \ln \frac{v_4}{v_3} = 4,157 \cdot \ln \frac{4,1}{11,7} = -4,35 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$q = l = T_3 \cdot \Delta s = 310 \cdot (-4,35) = -1349 \text{ кДж}/\text{кг} = -1,35 \text{ МДж}/\text{кг}.$$

Адіабатний процес 4-1

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_4) = 10,4 \cdot (773 - 310) = 4815 \text{ кДж/кг} = 4,82 \text{ МДж/кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_4) = 14,55 \cdot (773 - 310) = 6737 \text{ кДж/кг} = 6,74 \text{ МДж/кг};$$

$$\Delta s = 0; \quad q = 0;$$

$$l = -\Delta u = -4,82 \text{ МДж/кг}.$$

Характеристика циклу

Зміна калоричних параметрів за цикл

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-1} = 0 - 4,82 + 0 + 4,82 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-1} = 0 - 6,74 + 0 + 6,74 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-1} = 4,33 + 0 - 4,35 + 0 \approx 0.$$

Кількість теплоти, що корисно використано за цикл

$$q_{ц} = \sum_1^n q_i = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-1} = 3,35 + 0 - 1,35 + 0 = 2 \text{ МДж/кг}.$$

Кількість корисної роботи, що одержана за цикл

$$l_{ц} = \sum_1^n l_i = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} = 3,35 + 4,82 - 1,35 - 4,82 = 2 \text{ МДж/кг}.$$

$$q_{ц} = l_{ц}.$$

Кількість підведеної теплоти за цикл

$$q_1 = q_{1-2} = 3,35 \text{ МДж/кг}.$$

Кількість відведеної теплоти за цикл

$$q_2 = q_{3-4} = -1,35 \text{ МДж/кг}.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{1,35}{3,35} = 0,597.$$

Термічний ККД циклу Карно за формулою (6.6)

$$\eta_t = 1 - \frac{T_3}{T_1} = 1 - \frac{310}{773} = 0,598.$$

6.4.4. Газотурбінна установка працює з підведенням теплоти при $v = const$.

Відомі початкові значення параметрів: $p_1 = 0,14 \text{ МПа}$, $t_1 = 125 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_3 = 580 \text{ }^\circ\text{C}$, а

ступінь збільшення тиску $\lambda = \frac{p_2}{p_1} = 1,7$. Робоче тіло умовно має властивості газу

N_2 теплоємність якого вважати сталою. Обчислити значення відсутніх параметрів у характерних точках циклу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії у процесах протягом циклу, встановити кількість відведеної і підведеної теплоти, роботу, здійснену протягом циклу, термічний ККД.

Розв'язання

Визначаємо параметри газу в характерних точках циклу, рис. 6.10.

Точка 1 початок циклу

$$p_1 = 0,14 \text{ МПа}; t_1 = 125 \text{ }^\circ\text{C}; T_1 = t_1 + 273 = 125 + 273 = 398 \text{ К.}$$

Питомий об'єм газу знаходимо з рівняння стану газу

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{297 \cdot 398}{0,14 \cdot 10^6} = 0,844 \text{ м}^3/\text{кг},$$

де $R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{28} = 297 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома газова стала N_2 ,

де $\mu = 28 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – молярна маса газу N_2 .

Точка 2. $p_2 = \lambda \cdot p_1 = 1,7 \cdot 0,14 = 0,24 \text{ МПа}$.

Температуру T_2 визначаємо, скориставшись рівнянням адіабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 398 \cdot 1,7^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 463 \text{ К},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів.

Питомий об'єм обчислюємо з рівняння стану

$$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} = \frac{297 \cdot 463}{0,24 \cdot 10^6} = 0,57 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 3. $v_3 = v_2 = 0,57 \text{ м}^3/\text{кг}; T_3 = t_3 + 273 = 580 + 273 = 853 \text{ К}$.

$$v_3 = \frac{R \cdot T_3}{p_3} = \frac{4157 \cdot 310}{0,11 \cdot 10^6} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

З рівняння стану знаходимо

$$p_3 = \frac{R \cdot T_3}{v_3} = \frac{297 \cdot 853}{0,57} = 0,44 \cdot 10^6 \text{ Па} = 0,44 \text{ МПа}.$$

Точка 4. $p_4 = p_1 = 0,14 \text{ МПа}$.

З рівняння адіабати знаходимо T_4

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}; T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 853 \cdot \left(\frac{0,14}{0,44} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 615 \text{ К}.$$

Для визначення питомого об'єму використовуємо рівняння стану

$$v_4 = \frac{R \cdot T_4}{p_4} = \frac{297 \cdot 615}{0,14 \cdot 10^6} = 1,3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів, теплоту і роботу процесів циклу.

Обчислюємо теплоємності газу, вважаючи їх сталими

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{28} = 1,039 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$
 – масова ізобарна теплоємність,

де $\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних газів.

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 1,039 - 0,297 = 0,742 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Адіабатний процес 1-2

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,742 \cdot (463 - 398) = 48 \text{ кДж/кг};$$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,039 \cdot (463 - 398) = 68 \text{ кДж/кг};$$

Зміна ентропії газу

$$\Delta s = 0.$$

Кількість теплоти в процесі

$$q = 0.$$

Робота газу

$$l = -\Delta u = -48 \text{ кДж/кг}.$$

Ізохорний процес 2-3

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,742 \cdot (853 - 463) = 289 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1,039 \cdot (853 - 463) = 405 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,742 \cdot \ln \frac{853}{463} = 0,45 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$q = \Delta u = 289 \text{ кДж/кг};$$

$$l = 0.$$

Адіабатний процес 3-4

$$\Delta u = c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0,742 \cdot (615 - 853) = -177 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 1,039 \cdot (615 - 853) = -247 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = 0;$$

$$q = 0;$$

$$l = -\Delta u = 177 \text{ кДж/кг}.$$

Ізобарний процес 4-1

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_4) = 0,742 \cdot (398 - 615) = -161 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_4) = 1,039 \cdot (398 - 615) = -225 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = 1,039 \cdot \ln \frac{398}{615} = -0,45 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$q = \Delta h = -225 \text{ кДж/кг};$$

$$l = p_1 \cdot (v_1 - v_4) = 0,14 \cdot 10^3 \cdot (0,844 - 1,3) = -64 \text{ кДж/кг}.$$

Перевірка результатів розрахунку характеристик процесів

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-1} = 48 + 289 - 177 - 161 \approx 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-1} = 68 + 405 - 247 - 225 \approx 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-1} = 0 + 0,45 + 0 - 0,45 = 0.$$

Визначаємо основні характеристики циклу

Тепло, яке підведено до газу протягом циклу,

$$q_1 = q_{1-2} = 289 \text{ кДж/кг.}$$

Тепло, яке відведено від газу протягом циклу,

$$q_2 = |q_{3-4}| = 225 \text{ кДж/кг.}$$

Корисна робота циклу

$$l_u = q_1 - q_2 = 289 - 225 = 64 \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{64}{289} = 0,24.$$

6.4.5. Для циклу поршневого двигуна внутрішнього згорання з підведенням теплоти при $p = const$ знайти відсутні параметри у характерних точках, обчислити роботу, зміну ентальпії та внутрішньої енергії в процесах, термічний ККД, кількість підведеної і відведеної теплоти, якщо маємо значення величин: $p_1 = 0,10$ МПа; $t_1 = 120$ °С; $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 3,2$; $\rho = \frac{v_3}{v_2} = 1,2$. Робоче тіло умовно має властивості газу CO_2 . Теплоємність газу вважати сталою.

Розв'язання

Визначаємо параметри стану газу CO_2 в характерних точках циклу, рис. 6.6.

Точка 1.

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа; } T_1 = t_1 + 273 = 120 + 273 = 393 \text{ К.}$$

Питомий об'єм газу v_1 знаходимо з рівняння стану

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{189 \cdot 393}{0,1 \cdot 10^6} = 0,743 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\text{де } R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{44} = 189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{питома газова стала } \text{CO}_2,$$

де $\mu = 44$ кг/кмоль – молярна маса газу CO_2 .

Точка 2.

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,742}{3,2} = 0,232 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тиск p_2 і температуру T_2 визначаємо із рівнянь взаємозв'язків між параметрами в адіабатному процесі

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k; \quad p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,1 \cdot 3,2^{1,29} = 0,448 \text{ МПа},$$

де $k = 1,29$ – показник адіабати для багатоатомних газів.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 393 \cdot 3,2^{1,29-1} = 551 \text{ К.}$$

Точка 3.

$$p_3 = p_2 = 0,448 \text{ МПа.}$$

З рівняння ізобарного процесу знаходимо температуру T_3

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}; T_3 = \frac{v_3}{v_2} \cdot T_2 = \rho \cdot T_2 = 1,2 \cdot 551 = 661 \text{ К.}$$

Питомий об'єм $v_3 = \rho \cdot v_2 = 1,2 \cdot 0,232 = 0,278 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Точка 4.

Питомий об'єм $v_4 = v_1 = 0,743 \text{ м}^3/\text{кг}$.

З рівняння адіабатного процесу знаходимо тиск p_4

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k; p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = 0,448 \cdot \left(\frac{0,278}{0,743} \right)^{1,29} = 0,126 \text{ МПа.}$$

Температуру газу в кінці адіабатного процесу визначаємо з співвідношення параметрів в ізохорному процесі 4-1

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1}; T_4 = T_1 \cdot \frac{p_4}{p_1} = 393 \cdot \frac{0,126}{0,1} = 496 \text{ К.}$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів, теплоту і роботу процесів циклу.

Знаходимо теплоємності газу, вважаючи їх сталими.

Масова ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{37,4}{44} = 0,85 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

де $\mu c_p = 37,4 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ — мольна ізобарна теплоємність багатоатомних газів.

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 0,85 - 0,189 = 0,661 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Процес 1-2 адіабатний

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,661 \cdot (551 - 393) = 104 \text{ кДж}/\text{кг},$$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 0,85 \cdot (551 - 393) = 134 \text{ кДж}/\text{кг},$$

Зміна ентропії газу

$$\Delta s = 0.$$

Кількість теплоти в процесі

$$q = 0.$$

Робота газу

$$l = -\Delta u = -104 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Ізобарний процес 2-3

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,661 \cdot (661 - 551) = 73 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 0,85 \cdot (661 - 551) = 94 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,85 \cdot \ln \frac{661}{551} = 0,155 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$q = \Delta h = 94 \text{ кДж/кг};$$

$$l = R \cdot (T_3 - T_2) = 0,189 \cdot (661 - 551) = 21 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 3-4 адіабатний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0,661 \cdot (496 - 661) = -109 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 0,85 \cdot (496 - 661) = -140 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = 0.$$

$$q = 0.$$

$$l = -\Delta u = 108 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 4-1 ізохорний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_4) = 0,661 \cdot (393 - 496) = -68 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_4) = 0,85 \cdot (393 - 496) = -88 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,661 \cdot \ln \frac{393}{496} = -0,155 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$q = \Delta u = -69 \text{ кДж/кг};$$

$$l = 0.$$

Характеристики циклу

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-1} = 104 + 73 - 109 - 68 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-1} = 134 + 94 - 140 - 88 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-1} = 0 + 0,155 + 0 - 0,155 = 0.$$

Кількість теплоти, підведеної до газу,

$$q_1 = q_{2-3} = 94 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість теплоти, відведеної від газу,

$$q_2 = |q_{4-1}| = 69 \text{ кДж/кг}.$$

Корисна робота циклу

$$l_u = q_1 - q_2 = 94 - 69 = 25 \text{ кДж/кг}.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{25}{94} = 0,27.$$

6.4.6. Газова турбіна працює за циклом з підведенням теплоти при $p = const$. Відомі значення початкових параметрів: $p_1 = 0,08$ МПа; $t_1 = 128$ °С; $t_3 = 780$ °С, а ступінь збільшення тиску $\lambda = \frac{p_2}{p_1} = 1,5$. Робоче тіло має властивості

газу SO_2 . Встановити параметри у характерних для циклу точках, зміну ентропії, внутрішньої енергії та ентальпії у процесах, кількість відведеної та підведеної теплоти, обчислити роботу, що виконується за цикл і термічний

ККД. Теплоємність газу вважати сталою. Зобразити графік циклу в T - s координатах

Розв'язання

Визначаємо параметри стану газу в характерних точках циклу, рис. 6.9.

Точка 1.

$$p_1 = 0,08 \text{ МПа}; \quad t_1 = 128 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_1 = t_1 + 273 = 128 + 273 = 401 \text{ К.}$$

З рівняння стану визначаємо початковий об'єм газу

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{130 \cdot 393}{0,08 \cdot 10^6} = 0,652 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\text{де } R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{64} = 130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{питома газова стала } \text{SO}_2,$$

де $\mu = 64 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – молярна маса газу SO_2 .

Точка 2.

$$p_2 = \lambda \cdot p_1 = 1,5 \cdot 0,08 = 0,12 \text{ МПа.}$$

Температуру T_2 знаходимо, користуючись рівнянням адіабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_2 = T_1 \cdot \lambda^{\frac{k-1}{k}} = 401 \cdot 1,5^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 439 \text{ К.}$$

де $k = 1,29$ – показник адіабати для багатоатомних газів.

Точка 3.

$$p_3 = p_2 = 0,12 \text{ МПа}; \quad T_3 = t_3 + 273 = 780 + 273 = 1053 \text{ К.}$$

З рівняння стану газу знаходимо питомий об'єм v_3

$$v_3 = \frac{R \cdot T_3}{p_3} = \frac{130 \cdot 1053}{0,12 \cdot 10^6} = 1,14 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 4.

$$p_4 = p_1 = 0,08 \text{ МПа.}$$

З рівняння адіабати знаходимо T_4

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 1053 \cdot \left(\frac{0,08}{0,12} \right)^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 961 \text{ К.}$$

Питомий об'єм v_4 визначаємо, скориставшись рівнянням стану газу

$$v_4 = \frac{R \cdot T_4}{p_4} = \frac{130 \cdot 961}{0,08 \cdot 10^6} = 1,562 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів, теплоту і роботу процесів циклу.

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{37,4}{64} = 0,584 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{масова ізобарна теплоємність,}$$

де $\mu c_p = 37,4 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність багатоатомних газів.

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 0,584 - 0,13 = 0,454 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Процес 1-2 адіабатний

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,454 \cdot (439 - 401) = 17 \text{ кДж/кг},$$

Зміна ентальпії газу

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 0,584 \cdot (439 - 401) = 22 \text{ кДж/кг},$$

Зміна ентропії газу

$$\Delta s = 0.$$

Кількість теплоти в процесі

$$q = 0.$$

Робота газу

$$l = -\Delta u = -17 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 2-3 ізобарний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,454 \cdot (1053 - 439) = 279 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 0,584 \cdot (1053 - 439) = 359 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,584 \cdot \ln \frac{1053}{439} = 0,51 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$q = \Delta h = 359 \text{ кДж/кг},$$

$$l = R \cdot (T_3 - T_2) = 0,13 \cdot (1053 - 439) = 80 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 3-4 адіабатний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0,454 \cdot (961 - 1053) = -42 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 0,584 \cdot (961 - 1053) = -54 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = 0.$$

$$q = 0.$$

$$l = -\Delta u = 42 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 4-1 ізобарний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_4) = 0,454 \cdot (401 - 961) = -254 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_4) = 0,584 \cdot (401 - 961) = -327 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,584 \cdot \ln \frac{401}{961} = -0,51 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$q = \Delta h = -327 \text{ кДж/кг},$$

$$l = R \cdot (T_1 - T_4) = 0,13 \cdot (401 - 961) = -73 \text{ кДж/кг}.$$

Визначаємо основні характеристики циклу

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-1} = 17 + 279 - 42 - 254 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-1} = 22 + 359 - 54 - 327 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-1} = 0 + 0,51 + 0 - 0,51 = 0.$$

Тепло, яке підведено до газу $q_1 = q_{2-3} = 359$ кДж/кг.

Тепло, яке відведено від газу $q_2 = |q_{4-1}| = 327$ кДж/кг.

Корисна робота циклу $l_u = q_1 - q_2 = 359 - 327 = 32$ кДж/кг.

Термічний ККД циклу $\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{32}{359} = 0,1$.

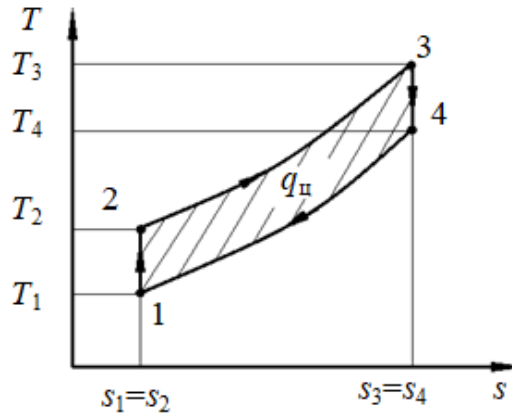


Рисунок 6.14 – Цикл газової турбіни з підводом теплоти при $p = const$ в T - s координатах

6.4.7. Поршневий двигун працює за циклом з підведенням теплоти при $v = const$. Робоче тіло має властивості повітря. У початковому стані температура його $t_1 = 115$ °С, тиск $p_1 = 0,13$ МПа. Ступінь стиснення

$$\frac{v_1}{v_2} = \varepsilon = 3,4, \text{ ступінь підвищення тиску } \frac{p_3}{p_2} = \lambda = 1,3.$$

Визначити параметри стану повітря в характерних точках циклу, кількість підведеної і відведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії у кожному процесі та за весь цикл, термічний ККД циклу і корисну роботу. Теплоємність повітря прийняти сталою.

Розв'язання

Цикл роботи ДВЗ з підведенням теплоти при $v = const$ зображено на рис. 6.5.

Параметри точки 1.

$$p_1 = 0,13 \text{ МПа}; T_1 = t_1 + 273 = 115 + 273 = 388 \text{ К.}$$

З рівняння стану знаходимо питомий об'єм на початку процесу

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 388}{0,13 \cdot 10^6} = 0,857 \text{ м}^3/\text{кг},$$

де $R = 287$ Дж/(кг·К) – газова стала повітря,

$\mu = 29$ кг/кмоль – молярна маса повітря.

Параметри точки 2.

Питомий об'єм v_2 в кінці процесу

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,857}{3,4} = 0,252 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тиск в кінці адіабатного стиску

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k; p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,13 \cdot 3,4^{1,4} = 0,721 \text{ МПа},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів.

Температура в кінці адіабатного стиску

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R} = \frac{0,721 \cdot 10^6 \cdot 0,252}{287} = 633 \text{ К}.$$

Параметри точки 3.

$$v_3 = v_2 = 0,252 \text{ м}^3/\text{кг}; p_3 = \lambda \cdot p_2 = 1,3 \cdot 0,721 = 0,937 \text{ МПа}.$$

Температуру в кінці процесу знаходимо з співвідношення параметрів в ізохорному процесі

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}; T_3 = \lambda \cdot T_2 = 1,3 \cdot 633 = 823 \text{ К}.$$

Параметри точки 4.

$$v_4 = v_1 = 0,857 \text{ м}^3/\text{кг}, \text{ тому що процес 4-1 є ізохорний.}$$

Тиск в кінці адіабатного процесу знаходимо з співвідношення параметрів в цьому процесі

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k; p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = 0,937 \cdot \left(\frac{0,252}{0,857} \right)^{1,4} = 0,169 \text{ МПа}.$$

Температура повітря наприкінці процесу

$$T_4 = \frac{p_4 \cdot v_4}{R} = \frac{0,169 \cdot 10^6 \cdot 0,857}{287} = 505 \text{ К}.$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів, роботу і теплоту в процесах циклу.

Знаходимо теплоємності повітря

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{29} = 1,003 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) - \text{масова ізобарна теплоємність повітря,}$$

де $\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних газів, $\mu = 29 \text{ кг}/\text{кмоль}$ – маса 1 кмоль повітря.

$c_v = c_p - R = 1,003 - 0,287 = 0,716 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – масова ізохорна теплоємність повітря.

Процес 1-2 адіабатний

$$\text{Зміна внутрішньої енергії } \Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,716 \cdot (633 - 388) = 175 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$\text{Зміна ентальпії газу } \Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,003 \cdot (633 - 388) = 246 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$\text{Зміна ентропії газу } \Delta s = 0.$$

$$\text{Кількість теплоти в процесі } q = 0.$$

$$\text{Робота газу } l = -\Delta u = -175 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Процес 2-3 ізохорний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,716 \cdot (823 - 633) = 136 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1,003 \cdot (823 - 633) = 191 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,716 \cdot \ln \frac{823}{633} = 0,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$q = \Delta u = 136 \text{ кДж/кг},$$

$$l = 0.$$

Процес 3-4 адіабатний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0,716 \cdot (505 - 823) = -228 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 1,003 \cdot (505 - 823) = -319 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = 0.$$

$$q = 0.$$

$$l = -\Delta u = 228 \text{ кДж/кг}.$$

Процес 4-1 ізохорний

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_4) = 0,716 \cdot (388 - 505) = -84 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_4) = 1,003 \cdot (388 - 505) = -117 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,716 \cdot \ln \frac{388}{505} = -0,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$q = \Delta u = -84 \text{ кДж/кг},$$

$$l = 0.$$

Перевірка результатів розрахунку характеристик процесів

$$\sum_1^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-1} = 175 + 136 - 228 - 84 = 0;$$

$$\sum_1^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-1} = 246 + 191 - 319 - 117 \approx 0;$$

$$\sum_1^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-1} = 0 + 0,19 + 0 - 0,19 = 0.$$

Характеристики циклу

Кількість теплоти, підведеної до робочого тіла за цикл

$$q_1 = q_{2-3} = 136 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість теплоти, відведеної від газу за цикл

$$q_2 = |q_{4-1}| = 84 \text{ кДж/кг}.$$

Корисна робота циклу

$$l_u = q_1 - q_2 = 136 - 84 = 52 \text{ кДж/кг}.$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{52}{136} = 0,38.$$

6.4.8. Робоче тіло поршневого двигуна внутрішнього згорання зі змішаним підведенням теплоти умовно має властивості газу SO. Відомі початкові значення параметрів: $p_1 = 0,11 \text{ МПа}$, $t_1 = 118 \text{ }^\circ\text{C}$ і такі характеристики циклу:

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 3,2$; $\lambda = \frac{p_3}{p_2} = 1,5$; $\rho = \frac{v_4}{v_3} = 1,17$. Обчислити параметри стану газу у характерних для циклу точках, кількість підведеної та відведеної теплоти, корисну роботу і термічний ККД циклу, зміну ентальпії та ентропії в процесах. Теплоємність газу вважати сталою.

Розв'язання

Визначаємо параметри стану газу SO в характерних точках циклу (рис. 6.7)

$$\text{Газова стала SO} - R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{48} = 173 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)},$$

де $\mu = 48 \text{ кг/кмоль}$ – молярна маса SO.

Точка 1.

$$p_1 = 0,11 \text{ МПа}; T_1 = t_1 + 273 = 118 + 273 = 391 \text{ К}.$$

З рівняння стану газу знаходимо v_1

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{173 \cdot 391}{0,11 \cdot 10^6} = 0,615 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2.

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,615}{3,2} = 0,192 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Користуючись рівнянням адіабати знаходимо тиск p_2 і температуру T_2

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k; p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,11 \cdot 3,2^{1,4} = 0,56 \text{ МПа},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для двохатомних газів.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 391 \cdot 3,2^{0,4} = 623 \text{ К}.$$

Точка 3.

$$v_3 = v_2 = 0,192 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_3 = \lambda \cdot p_2 = 1,5 \cdot 0,56 = 0,84 \text{ МПа};$$

$$T_3 = \lambda \cdot T_2 = 1,5 \cdot 623 = 935 \text{ К}.$$

Точка 4.

$$v_4 = \rho \cdot v_3 = 0,192 \cdot 1,17 = 0,225 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

З рівняння ізобари знаходимо T_4

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3}; T_4 = T_3 \cdot \rho = 935 \cdot 1,17 = 1094 \text{ К}.$$

Точка 5.

$$v_5 = v_1 = 0,615 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Використавши рівняння адіабати, знаходимо p_5

$$\frac{p_5}{p_4} = \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k; p_5 = p_4 \cdot \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = 0,84 \cdot \left(\frac{0,225}{0,615} \right)^{1,4} = 0,206 \text{ МПа}.$$

Температуру T_5 визначаємо з рівняння стану газу

$$T_5 = \frac{p_5 \cdot v_5}{R}, \quad T_5 = \frac{0,206 \cdot 10^6 \cdot 0,615}{173} = 731 \text{ К.}$$

Розраховуємо зміну калоричних параметрів, роботу і теплоту процесів циклу.

Знаходимо теплоємності газу, вважаючи їх сталими.

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,1}{48} = 0,606 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} - \text{ масова ізобарна теплоємність,}$$

де $\mu c_p = 29,1 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$ – мольна ізобарна теплоємність двохатомних газів.

Масова ізохорна теплоємність

$$c_v = c_p - R = 0,606 - 0,173 = 0,433 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Адіабатний процес 1-2

$$\text{Зміна внутрішньої енергії } \Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,433 \cdot (623 - 391) = 100 \text{ кДж/кг,}$$

$$\text{Зміна ентальпії газу } \Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 0,606 \cdot (623 - 391) = 141 \text{ кДж/кг,}$$

$$\text{Зміна ентропії газу } \Delta s = 0.$$

$$\text{Кількість тепла, яка приймає участь в процесі } q = 0.$$

$$\text{Робота газу } l = -\Delta u = -100 \text{ кДж/кг.}$$

Ізохорний процес 2-3

$$\Delta u = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,433 \cdot (935 - 623) = 135 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 0,606 \cdot (935 - 623) = 189 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,433 \cdot \ln \frac{935}{623} = 0,18 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$q = \Delta u = 135 \text{ кДж/кг,}$$

$$l = 0.$$

Ізобарний процес 3-4

$$\Delta u = c_v \cdot (T_4 - T_3) = 0,433 \cdot (1094 - 935) = 69 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 0,606 \cdot (1094 - 935) = 96 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta s = c_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = 0,606 \cdot \ln \frac{1094}{935} = 0,09 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$q = \Delta h = 96 \text{ кДж/кг,}$$

$$l = R \cdot (T_4 - T_3) = 0,173 \cdot (1094 - 935) = 28 \text{ кДж/кг.}$$

Адіабатний процес 4-5

$$\Delta u = c_v \cdot (T_5 - T_4) = 0,433 \cdot (731 - 1094) = -157 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_5 - T_4) = 0,606 \cdot (731 - 1094) = -220 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta s = 0, \quad q = 0.$$

$$l = -\Delta u = 157 \text{ кДж/кг.}$$

Ізохорний процес 5-1

$$\Delta u = c_v \cdot (T_1 - T_5) = 0,433 \cdot (391 - 731) = -147 \text{ кДж/кг,}$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_5) = 0,606 \cdot (391 - 731) = -206 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta s = c_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_5} = 0,433 \cdot \ln \frac{391}{731} = -0,27 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$q = \Delta u = -147 \text{ кДж/кг}, \quad l = 0.$$

Характеристики циклу

$$\sum_{i=1}^n \Delta u_i = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-4} + \Delta u_{4-5} + \Delta u_{5-1} = 100 + 135 + 69 - 157 - 147 = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta h_i = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} + \Delta h_{4-5} + \Delta h_{5-1} = 141 + 189 + 96 - 220 - 206 \approx 0;$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta s_i = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-4} + \Delta s_{4-5} + \Delta s_{5-1} = 0 + 0,18 + 0,09 + 0 - 0,27 = 0;$$

$$q_{\text{ц}} = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-5} + q_{5-1} = 0 + 135 + 96 + 0 - 147 = 84 \text{ кДж/кг};$$

$$l_{\text{ц}} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5} + l_{5-1} = 0 + 135 + 96 + 0 - 147 = 84 \text{ кДж/кг/}$$

Тобто, $l_{\text{ц}} \approx q_{\text{ц}}$, що підтверджує правильність розрахунків.

Кількість підведеного тепла за цикл

$$q_1 = q'_1 + q''_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = 135 + 96 = 231 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість відведеного тепла за цикл $q_2 = |q_{5-1}| = 147 \text{ кДж/кг}.$

Корисна робота циклу $l_{\text{ц}} = q_1 - q_2 = 231 - 147 = 84 \text{ кДж/кг}.$

Термічний ККД циклу $\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{84}{231} = 0,36.$

6.5. Задачі

6.5.1. Ідеальний поршневий двигун працює на газі за циклом Карно. Температура підведеної теплоти дорівнює t_4 , температура відведеної теплоти t_1 , причому найвищий тиск дорівнює 31 МПа, а найнижчий p_1 (табл. 6.3). Визначити параметри стану повітря у характерних точках циклу, обчислити роботу, зміну внутрішньої енергії, ентальпію, ентропію, термічний ККД циклу і кількість підведеної та відведеної теплоти. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

6.5.2. Поршневий двигун працює за циклом з підведенням теплоти, при цьому $V = \text{const}$ (рис. 6.5). Робоче тіло умовно має властивості газу (табл. 6.3). У початковому стані температура газу дорівнює t_1 , тиск газу p_1 . Ступінь стиснення $V_1/V_2 = \varepsilon$, ступінь підвищення тиску $p_3/p_2 = \lambda$. Визначити параметри стану газу в характерних точках циклу, кількість підведеної і відведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії, ентальпію, ентропію у кожному процесі та за весь цикл, термічний ККД циклу і корисну роботу. Теплоємність газу прийняти сталою. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

Таблиця 6.3

Остання цифра шифру	Газ	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{МПа}$	Передостання цифра шифру	ε	λ	ρ	n
0	H ₂	117	900	880	0,11	0	2,8	1,8	1,3	1,21
1	CO ₂	120	750	940	0,1	1	3,2	1,3	1,2	1,17
2	O ₂	130	1060	860	0,09	2	2,0	1,5	1,5	1,25
3	CO	140	730	980	0,15	3	2,5	1,7	1,2	1,26
4	CH ₄	135	650	910	0,12	4	2,3	1,4	1,4	1,18
5	N ₂	125	580	1010	0,14	5	2,4	1,4	1,16	1,14
6	SO	118	820	1050	0,11	6	3,2	1,5	1,17	1,13
7	SO ₂	128	780	840	0,08	7	3,1	1,3	1,15	1,20
8	CH ₄	132	720	890	0,07	8	2,7	1,4	1,3	1,19
9	Повіт.	115	690	950	0,13	9	3,4	1,3	1,4	1,23

6.5.3. Для циклу поршневого двигуна внутрішнього згорання з підведенням теплоти, в якому $p = const$ (рис. 6.6), знайти відсутні параметри у характерних точках, обчислити роботу, зміну ентальпії та внутрішньої енергії в процесах, термічний ККД, кількість підведеної і відведеної теплоти, якщо маємо значення величин p_1, t_1 , а $\varepsilon = V_1/V_2$; $\rho = V_3/V_2$. Робоче тіло умовно має властивості газу (табл. 6.3). Теплоємність газу вважати сталою. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

6.5.4. Робоче тіло поршневого двигуна внутрішнього згорання із змішаним підведенням теплоти (рис. 6.7) умовно має властивості газу (табл. 6.3). Відомі початкові значення параметрів p_1, t_1 і такі характеристики циклу: $\varepsilon = V_1/V_2$; $\lambda = p_3/p_2$; $\rho = V_4/V_3$. Обчислити параметри у характерних для циклу точках, кількість підведеної і відведеної теплоти, корисну роботу і термічний ККД циклу, зміну ентальпії, внутрішньої енергії та ентропії в процесах. Теплоємність газу вважати сталою. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

6.5.5. Газова турбіна працює за циклом з підведенням теплоти, при цьому $p = const$ (рис. 6.9). Відомі значення початкових параметрів: p_1, t_1, t_3 , а ступінь збільшення тиску $\lambda = p_2/p_1$. Робоче тіло умовно має властивості газу (табл. 6.3). Встановити параметри у характерних для циклу точках; зміну ентропії, внутрішньої енергії та ентальпії у процесах, кількість відведеної та підведеної теплоти, обчислити роботу, що виконується за цикл, і термічний ККД. Теплоємність газу вважати сталою. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$, скласти принципову схему газотурбінної установки.

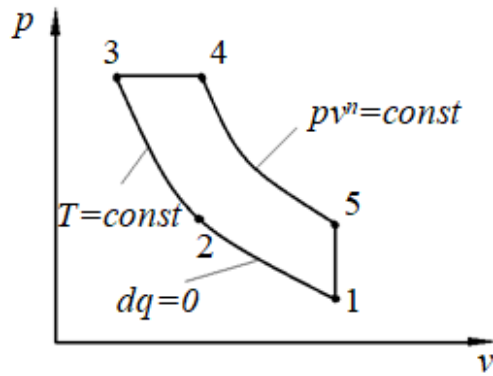


Рисунок 6.15 – Графік циклу роботи теплосилової установки до задачі 6.5.7

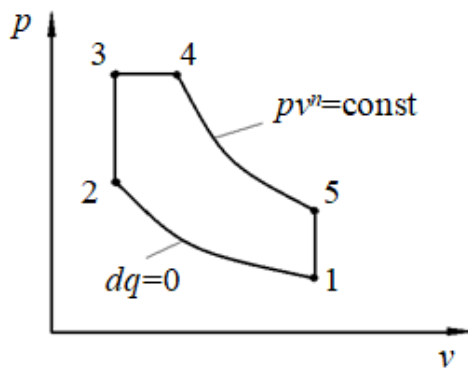


Рисунок 6.16 – Графік циклу роботи теплосилової установки до задачі 6.5.8

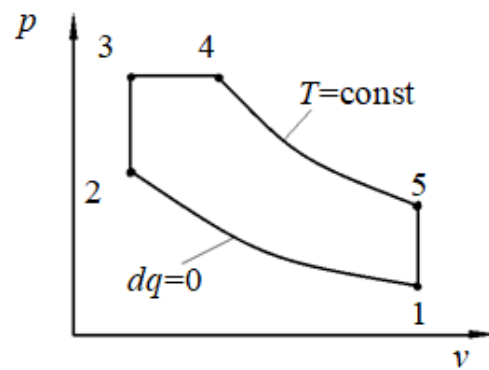


Рисунок 6.17 – Графік циклу роботи теплосилової установки до задачі 6.5.9

6.5.6. Газотурбінна установка працює з підведенням теплоти, при цьому $V = const$ (рис. 6.10). Відомі початкові значення параметрів: p_1, t_1, t_3 , а ступінь збільшення тиску $\lambda = p_2/p_1$. Робоче тіло умовно має властивості газу (табл. 6.3), теплоємність якого вважають сталою. Обчислити значення відсутніх параметрів у характерних точках циклу, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії у процесах протягом циклу; встановити кількість відведеної і підведеної теплоти, роботу, здійснену протягом циклу, термічний ККД. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

6.5.7. Теплосилова установка працює на газі за циклом, графік якого зображено на рис. 6.15. Відомі початкові значення параметрів p_1, t_1, t_4 , і такі характеристики $n, \lambda = p_3/p_2, \varepsilon = V_1/V_2$. Теплоємність газу вважати сталою. Обчислити значення параметрів у характерних для циклу точках, встановити зміну колоричних параметрів у кожному процесі і протягом усього циклу, кількість відведеної та підведеної теплоти, корисну роботу і термічний ККД циклу. Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

6.5.8. Обчислити параметри у характерних точках, зміну ентальпії, ентропії, внутрішньої енергії, кількість відведеної і підведеної теплоти, корисну

роботу і термічний ККД циклу роботи теплосилової установки, графік якої показано на рис. 6.16. За робоче тіло береться газ (табл. 6.3). Відомі початкові значення параметрів P_1 , t_1 , t_4 і такі характеристики циклу: $\varepsilon = V_1/V_2$, $\lambda = p_3/p_2$, n . Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

6.5.9. У циклі роботи теплосилової установки (рис. 6.17) відомі початкові значення параметрів p_1 , t_1 , t_4 і такі характеристики циклу: $\varepsilon = V_1/V_2$, $\lambda = p_3/p_2$. Обчислити значення параметрів у характерних точках циклу, зміну калоричних параметрів у процесах, кількість підведеного і відведеного тепла, роботу циклу і його термічний ККД. За робоче тіло береться газ (табл. 6.3). Зобразити графік циклу в координатах $p-v$ і $T-s$.

7. ТЕРМОДИНАМІКА РЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Викладено короткі теоретичні відомості про фазові переходи в чистій речовині та основні їх закономірності; про закономірності процесу пароутворення; вологу насичену пару та степінь її сухості, суху насичену та перегріту пару; про визначення параметрів води і водяної пари за таблицями теплофізичних параметрів та з діаграм; про послідовність розрахунку парових термодинамічних процесів.

Мета – сформуувати знання про основні закономірності фазових переходів у чистій речовині, визначення параметрів стану пари за таблицями та спеціальними діаграмами, розрахунки парових термодинамічних процесів.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- визначати аналітично параметри процесів зміни стану водяної пари;
- визначати за допомогою таблиць і діаграм параметри процесів зміни стану водяної пари;
- розраховувати парові термодинамічні процеси.

7.1. Загальні відомості

Між газоподібним і пароподібним станами речовини не існує формальної різниці, й газ можна розглядати як дуже перегріту пару, а пару – як газ, що перебуває поблизу стану скраплення. З якісної сторони поведінка пари усіх речовин однакова, тому все, про що буде говоритися нижче стосовно водяної пари, однаковою мірою відноситься до пари будь-якої іншої речовини. В якості реального газу розглянемо водяну пару, яка широко використовується в багатьох галузях техніки і найперше в теплоенергетиці, де вона є основним робочим тілом. Тому дослідження термодинамічних властивостей води і водяної пари, а також термодинамічних процесів водяної пари має велике практичне значення.

У теплоенергетичних установках водяна пара використовується при таких тисках і температурах, що нехтування в розрахунках силами зчеплення та об'ємом молекул призвело б до значних похибок. Тому застосовувати до водяної пари в цих станах законів ідеальних газів було б помилковим. Пара – це реальний газ, тому не можна застосовувати до неї рівняння стану ідеального газу $p \cdot v = R \cdot T$. Рівняння стану для пари досить складні, тому в широкій розрахунковій практиці майже не застосовуються.

Для вирішення завдань, пов'язаних із застосуванням пари, використовують таблиці й діаграми, складені на підставі практикованих і теоретичних даних.

Одержання водяної пари для практичного застосування здійснюється переважно в спеціальних котельних агрегатах. Незалежно від призначення, величини й конструкції парових котлів процес пароутворення та одержання

пари в них завжди йде при постійному тиску. Величина тиску буває досить різною, від 0,1 до 30 МПа.

7.1.1. Параметри й властивості водяної пари, діаграма $p-v$

При вивченні процесу утворення водяної пари в термодинаміці вихідним станом прийнято вважати воду, що перебуває в стані, який відповідає потрійній точці, тобто при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для цього стану приймають нульові значення питомої ентальпії, ентропії та внутрішньої енергії ($h_0 = 0$; $s_0 = 0$; $u_0 = 0$) [3].

Як приклад утворення пари при постійному тиску $p = 5$ МПа схематично зображено на рис. 7.1, а на рис. 7.2 подано процес пароутворення в $p-v$ -діаграмі. Процес пароутворення в прикладі розглядається для 1 кг води.

При температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вода перебуває в рідкій фазі і має питомий об'єм $v_0 = 0,001\text{ м}^3/\text{кг}$. На $p-v$ -діаграмі цей стан позначений точкою **1**.

Для позначення величин, для різних станів води й пари, прийнята така індексація. Величини з індексами: 0 – означають початковий стан води; ' – воду, нагріту до температури кипіння; x – вологе повітря; " – суху пару; величини без індексів означають перегріту пару.

Якщо до води підводити тепло при постійному тиску $p = 5$ МПа, то температура її буде підвищуватися, а питомий об'єм збільшуватися. У стані **2** (рис. 7.1), що відповідає температурі $263,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, утворяться перші парові бульбашки; це означає, що вода досягла стану кипіння. Температура пари, що утвориться, дорівнює температурі кипіння води, її прийнято називати температурою насичення. Температура насичення t_n залежить тільки від тиску. Питомий об'єм киплячої води v' став трохи більшим від початкового $v_0 = 0,00129\text{ м}^3/\text{кг}$.

Встановимо, що параметри киплячої води, такі як питомий об'єм, ентальпія, ентропія й внутрішня енергія, прийнято позначати з індексом штрих, тобто v' ; h' ; s' ; u' .

Кількість тепла, витраченого для нагрівання 1 кг води (рідини) від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температури кипіння при постійному тиску, називають теплотою рідини. Її можна визначити як різницю ентальпії рідини в стані кипіння і рідини при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при тому самому тиску

$$q_{\text{ж}} = h_2 - h_1 = h' - h_0, \text{ кДж/кг.} \quad (7.1)$$

Тому що питома ентальпія води при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $h_0 = 0$, то

$$q_{\text{ж}} = h', \text{ кДж/кг,} \quad (7.2)$$

тобто ентальпія киплячої води дорівнює теплоті рідини.

Питома внутрішня енергія киплячої рідини визначається із загальної формули для питомої ентальпії

$$h = u + p \cdot v \text{ чи } u' = h' - p \cdot v', \text{ кДж/кг.} \quad (7.3)$$

При подальшому підведенні теплоти до води, нагрітої до температури кипіння при даному тиску, почнеться перетворення її в пару. При цьому кількість води зменшується, кількість пари збільшується.

У процесі пароутворення температура буде залишатися постійною доти, поки не перетвориться в пару остання крапля води (рідини). Двофазну систему, суміш сухої пари й киплячої рідини (стан **3**, рис. 7.1), називають вологою парою. У кінцевому стані волога пара перетворюється в суху насичену пару (стан **4**, рис. 7.1).

Найважливіша характеристика вологої пари – ступінь сухості. Ступінь сухості пари x виражає масову частку сухої насиченої пари у вологій, тобто

$$x = \frac{M_{\text{п}}}{(M_{\text{п}} + M_{\text{в}})}, \quad (7.4)$$

де $M_{\text{п}}$ – маса сухої насиченої пари у вологій парі, кг; $M_{\text{в}}$ – маса води у вологій парі, кг.

Очевидно, значення $x = 0$ відповідає початковому моменту пароутворення, а $x = 1$ – кінцю пароутворення.

Питомий об'єм, ентальпію, ентропію й внутрішню енергію вологої пари позначають із підрядковим індексом x , тобто v_x, h_x, s_x, u_x . Відповідно ці самі параметри сухої насиченої пари позначають v'', h'', s'', u'' .

Якщо врахувати, що 1 кг вологої пари містить x кг сухої насиченої пари й $(1 - x)$ кг киплячої води, то очевидно, що питомий об'єм вологої пари v_x можна визначити за рівнянням

$$v_x = v'' \cdot x + (1 - x) \cdot v', \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (7.5)$$

Із цієї формули виходить значення

$$x = \frac{(v_x - v')}{(v'' - v')}. \quad (7.6)$$

Кількість теплоти, яка витрачена на перетворення 1 кг киплячої води в суху насичену пару при $p = \text{const}$, називають теплотою пароутворення й позначають r .

Ентальпія вологої пари h_x – це кількість тепла, необхідного для перетворення 1 кг води з $t = 0$ °С у вологу пару при $p = \text{const}$.

Очевидно, що

$$h_x = h' + r \cdot x, \text{ кДж/кг,} \quad (7.7)$$

де h' – питома ентальпія киплячої рідини; $r \cdot x$ – кількість теплоти, витраченої на випаровування x частки води.

Питома внутрішня енергія вологої пари

$$u_x = h_x - p \cdot v_x. \quad (7.8)$$

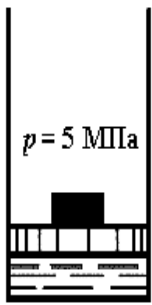
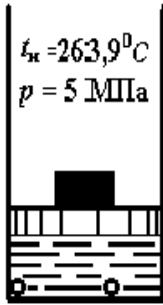
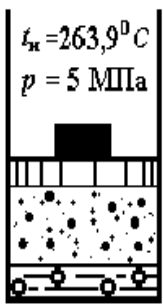
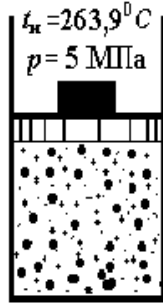
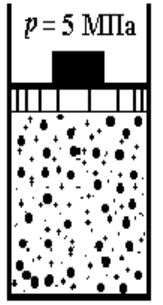
Стан	1	2	3	4	5
Схематичне зображення процесу пароутворення та фазових переходів з одного стану в інший					
Змінні величини	Рідина	Кипляча рідина	Волога пара	Суха насичена пара	Перегріта пара (газ)
Маса води, кг	$M_B = 1$	$M_B = 1$	$M_B = (1 - x)$	$M_B = 0$	$M_B = 0$
Маса пари, кг	$M_{II} = 1$	$M_{II} = 0$	$M_{II} = x$	$M_{II} = 1$	$M_{II} = 1$
Температура, °C	$t = t_0 = 0$	$t = t_H$	$t = t_H$	$t = t_H$	$t > t_H$
Питомий об'єм, м³/кг	$v_0 = 0,001$	$v' > v_0$	$v_x = v''_x + v'(1-x)$	$v'' > v_x$	$v > v''$
Ступінь сухості пари	—	$x = 0$	$0 < x < 1$	$x = 1$	—
Теплота пароутворення, кДж/кг	—	$r = 0$	r_x	r	—
Ентальпія, кДж/кг	$h_0 = 0$	$h' > 0$	$h_x = h' + r_x$	$h'' = h' + r$	$h = h'' + q$
Ентропія, кДж/кг·К	$s_0 = 0$	$s' > 0$	$s_x = s' + r \cdot x / T_H$	$s'' = s' + r / T$	$s > s''$

Рисунок 7.1 – Схематичне зображення процесу пароутворення при $p = const$

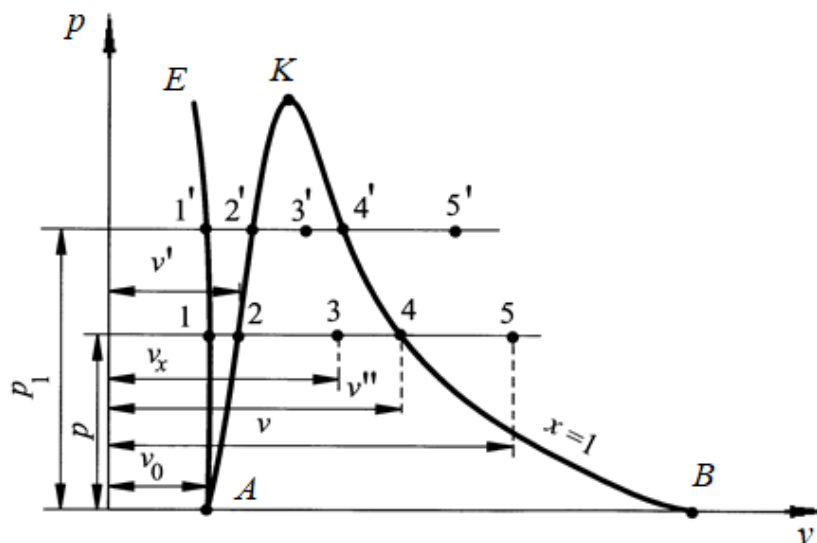


Рисунок 7.2 – Графік процесу пароутворення в p - v -координатах

Питома ентропія вологої пари визначається за формулою

$$s_x = s' + \frac{r \cdot x}{T_H} \quad (7.9)$$

Питома ентальпія сухої ($x = 1$) насиченої пари визначається за формулою

$$h'' = h' + r, \text{ кДж/кг.} \quad (7.10)$$

Питома внутрішня енергія сухої насиченої пари визначається за формулою

$$u'' = h'' - p \cdot v'' \quad (7.11)$$

Якщо суху насичену пару, яка перебуває в стані **4** (див. рис. 7.1), продовжувати нагрівати далі, то її температура й об'єм будуть збільшуватися. Пара, у якої температура t вища від температури насичення t_H при тому самому тиску, називається перегрітою. На противагу насиченій парі, перегріта пара – є ненасиченою. Це лише інша назва газу. Різницю температур $t - t_H$ називають перегрівом пари.

Кількість тепла, необхідного для перетворення 1 кг сухої насиченої пари в перегріту при постійному тиску, називається теплою перегріву q_n . Вона може бути визначена за формулою

$$q_n = h - h'', \text{ кДж/кг,} \quad (7.12)$$

де h – ентальпія перегрітої пари, кДж/кг.

Під ентальпією перегрітої пари варто розуміти кількість тепла, що витрачене на перетворення 1 кг води з $t = 0$ °С у перегріту пару даних параметрів при $p = const$.

Питома внутрішня енергія перегрітої пари визначається за формулою

$$u = h - p \cdot v \quad (7.13)$$

Описаний вище процес пароутворення можна провести при різних тисках. Як і раніше, характерні стани будемо відзначати точками на p - v -діаграмі. Досліджуємо процес пароутворення при тиску p_1 , більш високому, ніж p . Тому що вода є речовиною, майже не стисливою, питомий об'єм її при p_1 буде практично таким самим, як при p (точка **1**). Разом із тим, більш високому тиску відповідає й більш висока температура кипіння, що зробить свій вплив на питомий об'єм киплячої води. Тому точка **2'** буде лежати на своїй ізобарі правіше від точки **2**.

Більш високий тиск зробить свій вплив і на питомий об'єм сухої насиченої пари, він буде меншим, ніж при p (точка **4'**).

Якщо розглянути ще кілька випадків пароутворення з початковим тиском води, що підвищується щоразу, то точки, які характеризують стан води при 0 °С, будуть лягати на пряму, майже паралельну осі ординат; точки, які належать воді в стані кипіння, із зростанням тиску будуть відхилятися вправо, а точки, що характеризують стан сухого насиченої пари – вліво. При деякому тиску точки, які характеризують ці два стани, будуть збіжними.

Якщо на рис. 7.2 провести лінію через точки однакових характерних станів, то одержимо три криві. Крива AE з'єднує всі точки, які характеризують стан води при $t = 0$ °С і різних тисках. Вона майже паралельна осі ординат.

Графік залежності питомого об'єму киплячої води v' від тиску відображений кривою AK , що називається нижньою (лівою) прикордонною кривою або лінією киплячої рідини, її характеристикою є ступінь сухості $x = 0$. Крива KB є геометричним місцем точок, які характеризують суху насичену пару. Її називають верхньою (правою) прикордонною кривою або лінією сухої пари. Характеристикою кривої KB є ступінь сухості $x = 1$.

Прикордонні криві AK і KB сходяться в точці K , яка називається критичною точкою. У цій точці кипляча вода й суха насичена пара мають однакові параметри стану. Всі параметри цієї точки називаються критичними й мають для водяної пари такі значення

$$p_k = 22,1 \text{ МПа}; \quad t_k = 374 \text{ }^\circ\text{C}; \quad v_k = 0,00315 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Вище критичної точки існування речовини у двофазному стані неможливе. Ніяким тиском не можна перевести газ у рідинний стан при температурах, вищих від критичної.

Таким чином, прикордонна крива рідини AK і прикордонна крива пари KB ділять діаграму на три частини. Ліворуч від AK до нульової ізотерми AE розташовується зона рідини, між кривими AK і KB перебуває зона двофазної системи, що складається із суміші води й сухого насиченої пари. Праворуч від KB і вгору від точки K розташовується зона перегрітої пари або газоподібного стану тіла. Зона, яка розташована ліворуч від AE , являє собою зону рівноважного існування рідкої й твердої фаз. У зоні вологої пари ізобари одночасно є ізотермами (наприклад, лінія **2 – 4**).

7.1.2 Діаграма T - s водяної пари

Процес одержання перегрітої пари складається з трьох послідовних стадій: підігрівання води до температури кипіння, пароутворення й перегріву пари до необхідної температури. Всі ці стадії протікають при постійному тиску, й на T - s -діаграмі (рис. 7.3) зображуються ізобарою **1 – 2 – 3 – 4 – 5**.

Ізобарний процес нагрівання води від $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ (273 К) до температури насичення T_n в T - s -діаграмі зображується близькою до логарифмічного виду кривою **1 – 2**. Із точки **2** починається процес пароутворення, що протікає при постійній температурі T_n , кінець процесу пароутворення характеризується точкою **4**; таким чином, процес пароутворення зображується лінією **2 – 4**, паралельною осі абсцис. Подальше підведення тепла при постійному тиску знову супроводжується підвищенням температури, й процес перегріву пари при $p = \text{const}$ зображується близькою до логарифмічного виду кривою **4 – 5**.

Ізобарний процес на рис. 7.3 показаний ізобарою **1' – 2' – 3' – 4' – 5'**.

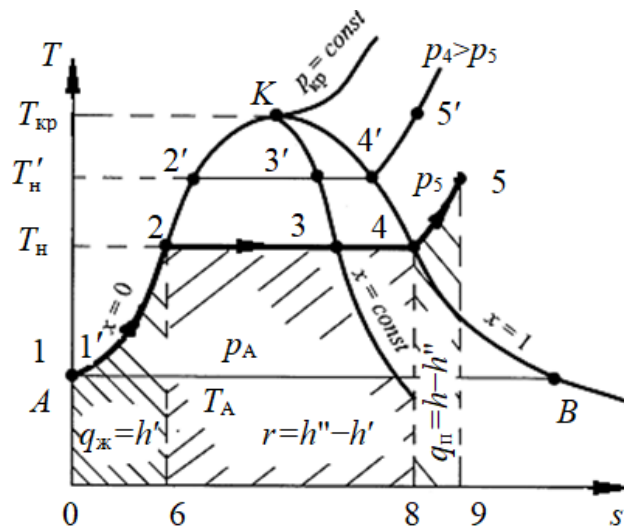


Рисунок 7.3 – Графік процесу пароутворення в T - s -координатах

Якщо нанести на діаграму ряд таких ізобарних процесів і з'єднати характерні точки, то одержимо прикордонні криві киплячої рідини AK ($x = 0$) і сухої пари KB ($x = 1$), які сходяться в критичній точці.

У T - s -діаграмі площа під кривою процесу в деякому масштабі виражає питоме тепло процесу. Тому площа $0 - 1 - 2 - 6 - 0$ вимірює кількість тепла, підведеного при нагріванні води від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температури кипіння, тобто h' ; площа $6 - 2 - 4 - 8 - 6$ – кількість тепла, необхідного для того, щоб воду при температурі кипіння перевести в суху насичену пару; площа $8 - 4 - 5 - 9 - 8$ – кількість тепла, необхідного для перегріву пари, зумовлена формулою (2.12). Вся площа $0 - 1 - 2 - 4 - 5 - 9 - 0$ під лінією процесу $1 - 2 - 3 - 4 - 5$ еквівалентна ентальпії перегрітої пари.

7.2. Визначення параметрів водяної пари

Перегріта пара і ще більшою мірою волога та суха насичена пара за своїми властивостями значно відрізняються від ідеальних газів. Рівняння стану для пари досить складні і в інженерній практиці не застосовуються. Внаслідок цього з практичною метою використовуються таблиці та h - s -діаграма, складені на підставі дослідних і теоретичних даних.

7.2.1. Таблиці водяної пари

У скороченому вигляді таблиці наведені в додатках. У додатку табл. 12 наведені таблиці для сухої насиченої пари й води на кривій насичення (за тиском); у додатку табл. 13 – для сухої насиченої пари й води на кривій насичення (за температурою); у додатку табл. 14 – для перегрітої пари і води.

Для визначення параметрів води або перегрітої пари за таблицями додатку необхідно знати тиск і температуру. Таблиця насиченої пари, води і перегрітої пари дозволяє з великою точністю виконувати теплотехнічні розрахунки.

Приклади, як користуватися таблицями для визначення відсутніх параметрів водяної пари, що перебуває в різних станах, наведені нижче.

7.2.2. Діаграма $h-s$ водяної пари

Розглянемо ще одну діаграму стану, яка набула широкого застосування в теплотехнічних розрахунках паросилової техніки.

$h-s$ -Діаграма вперше запропонована в 1904 р. німецьким теплотехніком Р. Мольє (див. додатки). Великою перевагою $h-s$ -діаграми є те, що технічна робота і кількість теплоти, які беруть участь у процесах, зображуються відрізками ліній, а не площинами, як це має місце на $T-s$ -діаграмі.

На діаграмі (див. рис. 7.4) на осі ординат відкладається питома ентальпія пари, а на осі абсцис – питома ентропія. За початок координат прийнято стан води в потрійній точці, де $s_0 = 0$, $i_0 = 0$. На діаграмі нанесені прикордонні криві рідини і пари, що сходяться в критичній точці К. Лінії ізобар у зоні вологої пари є прямими похилими, розходяться вгору від прикордонної кривої рідини. Ізотерми у зоні вологої пари збігаються з ізобарами. У зоні перегрітої пари вони розходяться: ізобари підіймаються вгору у вигляді логарифмічних кривих, а ізотерми являть собою криві лінії опуклістю вгору і прагнуть до горизонталі при низькому тиску. На діаграму наноситься сітка ізохор у вигляді пунктирних кривих ліній, що підіймаються більш круто вгору порівняно з ізобарами.

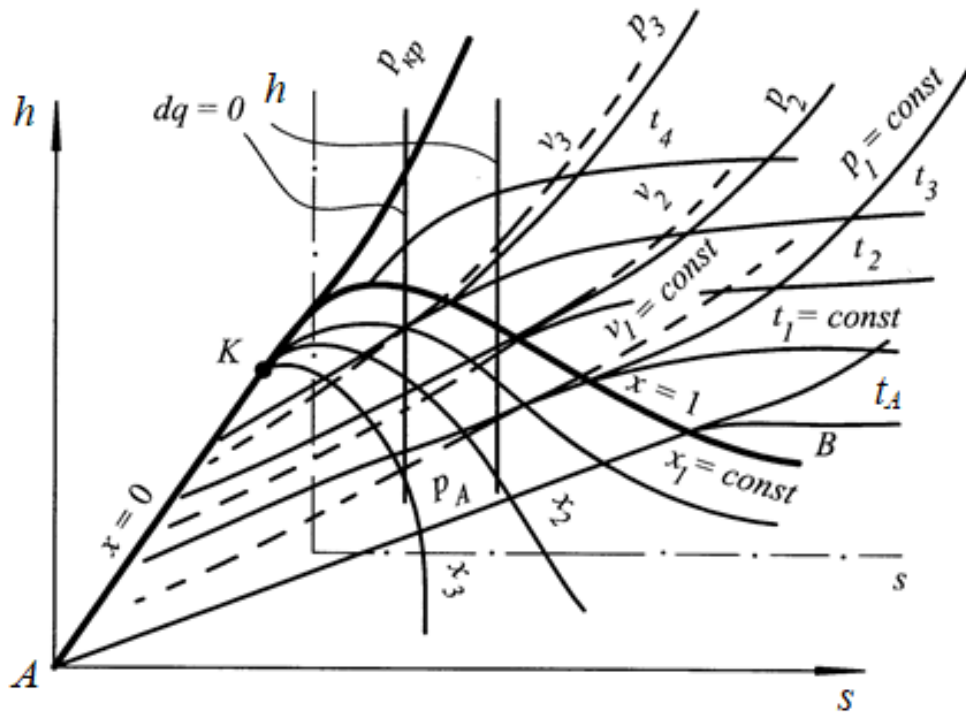
Адіабатний процес на $h-s$ -діаграмі зображується вертикальною прямою. Тому сітка вертикальних ліній на $h-s$ -діаграмі являє собою адіабати.

У зоні вологої пари наноситься сітка ліній постійної сухості пари ($x = const$), які сходяться в критичній точці К.

Звичайно всю $h-s$ -діаграму не виконують, а викреслюють тільки верхню частину, тобто відкидається частина діаграми для зони вологої пари із ступенем сухості пари нижчим 0,5. Робоча частина діаграми на рис. 7.4 виділена штрих-пунктирними $h-s$ -координатами [4].

В кінці методичних вказівок додається діаграма у такому вигляді, що можна визначати параметри пари (див. додатки).

Діаграма $h-s$ має багато переваг: вона дозволяє швидко визначати параметри пари з достатньою точністю для інженерних розрахунків, дає можливість визначати роботу і кількість теплоти у вигляді відрізків ліній, наочно зображає адіабатний процес, що має велике значення при вивченні паросилових установок, і, нарешті, дозволяє швидко й наочно розраховувати та аналізувати основні парові термодинамічні процеси.

Рисунок 7.4 – Діаграма h - s водяної пари

7.3. Основні термодинамічні процеси водяної пари

При розв'язуванні задач на термодинамічні процеси в зоні насиченої і перегрітої пари можна використовувати таблиці води і водяної пари або h - s -діаграму. У цих задачах звичайно визначаються: початкові й кінцеві параметри пари, зміна внутрішньої енергії, ентальпія і ентропія, ступінь сухості, робота і кількість тепла, які беруть участь у даному процесі.

При використанні таблиць для розрахунків процесів водяної пари всі необхідні вихідні дані, а також параметри пари в кінцевому стані беруться з таблиць з урахуванням умов протікання процесу ($v = const$, $p = const$ і т. д.). Параметри вологої пари в цьому випадку обчислюються за формулами (7.5, 7.7, 7.9).

Метод розрахунку процесів за таблицями є найточнішим і застосовується в тих випадках, коли потрібно одержати точні величини. Проте це вимагає більших затрат часу на знаходження потрібних величин за таблицями, а також на додаткові обчислювальні операції.

Більш простим і наочним, але менш точним є графічний метод розрахунку процесів за h - s -діаграмою водяної пари. Цей метод дозволяє стежити за зміною агрегатного стану пари в будь-якому процесі і наочно уявити, як здійснюється процес з його графічним зображенням. Загальний метод розрахунку за h - s -діаграмою має такі етапи. Наноситься початковий стан пари за його заданими параметрами. Проводиться лінія процесу і визначаються параметри в кінцевій точці. Побудова термодинамічних процесів здійснюється за допомогою таких ліній: ізохорного – ізохорою $v = const$; ізобарного – ізобарою $p = const$;

ізотермічного – ізотермою $t = const$; адіабатного – адіабатою $s = const$. Точки початку й кінця процесу знаходяться на перетині відповідних кривих, як це показано на рисунках у прикладах розв’язку задач.

Розрахункові співвідношення для обчислення змін внутрішньої енергії, роботи і кількості теплоти, що беруть участь в термодинамічних процесах водяної пари, зведені у табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Формули для обчислення зміни внутрішньої енергії Δu , роботи l і теплоти q у парових термодинамічних процесах

Процес	Зміна внутрішньої енергії	Кількість роботи	Кількість теплоти
Ізо-хорний	$\Delta u_{1-2} = u_1 - u_2 = h_2 - h_1 - v \cdot (p_2 - p_1)$	$l_{1-2} = 0$	$q_{1-2} = \Delta u_{1-2}$
Ізо-барний	$\Delta u_{1-2} = u_1 - u_2 = h_2 - h_1 - p \cdot (v_2 - v_1)$	$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} = p \cdot (v_2 - v_1)$	$q_{1-2} = \Delta h_{1-2} = h_2 - h_1$
Ізо-термічний	$\Delta u_{1-2} = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1)$	$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2}$	$q_{1-2} = T \cdot (s_2 - s_1)$
Адiабат-ний	$\Delta u_{1-2} = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1)$	$l_{1-2} = -\Delta u_{1-2} = u_1 - u_2$	$q_{1-2} = 0$

Нижче наведені приклади, в яких показано, як за допомогою h - s -діаграми (див. додатки) визначаються параметри пари для заданих умов, виконуються розрахунки термодинамічних процесів і як показуються графічно ці процеси.

7.4. Методичні рекомендації до розв’язування задач

При вивченні даної теми студент повинен твердо засвоїти, що водяна пара відноситься до реальних газів, властивості яких виключають можливість застосування для їх розрахунків рівнянь, придатних для ідеального газу. Розраховуючи процеси пов’язані з водяною парою, треба уміти користуватися таблицями для водяної пари або h - s діаграмою водяної пари.

Необхідно добре засвоїти поняття сухої насиченої пари, вологої насиченої пари, перегрітої пари і знати, якими параметрами здається кожний стан пари, уміти зображувати графіки парових процесів у діаграмах p - v , T - s , h - s . Вихідні дані для розв’язування задач наведено в табл. 7.2, 7.3.

7.5. Питання для самоконтролю

7.5.1. Чим відрізняються властивості водяної пари від властивостей ідеального газу?

7.5.2. Що називається пароутворенням і випаровуванням?

7.5.3. Визначте поняття температура насичення.

7.5.4. Від чого залежить температура насичення речовини?

7.5.5. Яка пара називається вологою насиченою, сухою насиченою, перегрітою?

7.5.6. Що являє собою ступінь сухості й вологості?

7.5.7. З'ясуйте поняття теплоти пароутворення.

7.5.8. Які рівняння справедливі для ідеального та реального газів?

7.5.9. Зобразіть діаграму водяної пари в координатах $p-v$.

7.5.10. Охарактеризуйте стан пари та її параметри у критичній точці.

7.5.11. Проаналізуйте таблиці насиченої і ненасиченої водяної пари і їхнє призначення.

7.5.12. Зобразіть діаграму в координатах $T-s$ й охарактеризуйте підведення тепла у процесі пароутворення.

7.5.13. Зобразіть діаграму водяної пари в координатах $h-s$.

7.5.14. Яким чином можна визначити питомий об'єм, ентальпію, ентропію вологої пари?

7.6. Приклади розв'язування задач

7.6.1. Визначити відсутні параметри киплячої рідини, якщо відомо, що абсолютний тиск у котельній установці дорівнює 2,8 МПа.

Розв'язання

Задачу розв'язуємо за допомогою таблиці 12 (див. додатки) для насиченої водяної пари. При тиску $p = 2,8$ МПа за таблицею знаходимо: $t_n = 230$ °С, $v' = 0,0012088$ м³/кг, $h' = 990$ кДж/кг, $s' = 2,6101$ кДж/(кг·К).

7.6.2. Визначити температуру, питомий об'єм, густину, ентальпію і ентропію сухої насиченої пари при тиску 2 МПа.

Розв'язання

За таблицею 12 (див. додатки) знаходимо: $t_n = 212,37$ °С, $v'' = 0,09958$ м³/кг, $h'' = 2799$ кДж/кг, $s'' = 6,340$ кДж/(кг·К).

7.6.3. Визначити стан водяної пари, якщо відомо, що його абсолютний тиск 10 МПа, а питомий об'єм $v = 0,00165$ м³/кг.

Розв'язання

З таблиці 12 (див. додатки) видно, що при тиску 10 МПа питомий об'єм киплячої рідини $v' = 0,001452$ м³/кг, питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,01803$ м³/кг.

Оскільки задане значення питомого об'єму пари перебуває між значеннями v' і v'' , отже пара є вологою насиченою.

7.6.4. При тиску 15 МПа вода нагріта до $t = 250$ °С. На скільки градусів потрібно догріти воду, щоб почалося кипіння.

Розв'язання

За таблицею 12 (див. додатки) при даному тиску знаходимо температуру насичення $t_n = 342,11$ °С. Отже, для того, щоб вода почала кипіти, її необхідно ще підігріти на $\Delta t = t_n - t = 342,11 - 250 = 92,11$ °С.

7.6.5. Визначити відсутні параметри вологої насиченої пари, якщо її тиск $p = 0,5$ МПа, ступінь сухості $x = 0,85$.

12 (див. додатки), знаходимо: $t_n = 151,8$ °С,
 $v' = 0,001093$ м³/кг, $v'' = 0,3740$ м³/кг, $h' = 640,1$ кДж/кг, $h'' = 2748,9$ кДж/кг,
 $r = 2108$ кДж/кг, $s' = 1,86$ кДж/(кг · К), $s'' = 6,82$ кДж/(кг · К).

Використовуючи формули для вологої насиченої пари і значення знайдених параметрів киплячої рідини та сухої насиченої пари, визначаємо

$$v_x = v'' \cdot x + (1 - x) \cdot v' = 0,3740 \cdot 0,85 + (1 - 0,85) \cdot 0,001093 = 0,3187 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_x = h' + r \cdot x = 640,1 + 2108 \cdot 0,85 = 2432 \text{ кДж/кг};$$

$$s_x = s' + \frac{r \cdot x}{T_n} = 1,861 + \frac{2108 \cdot 0,85}{273 + 151,8} = 6,08 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$u_x = h_x - p \cdot v_x = 2432 - 0,5 \cdot 10^3 \cdot 0,3187 = 2273 \text{ кДж/кг}.$$

7.6.6. Визначити стан водяної пари, якщо її тиск $p = 7$ бар, а температура $t = 210$ °С.

Розв'язання

Тиску 7 бар за таблицею 12 (див. додатки) відповідає температура насичення $t_n = 164,96$ °С. Оскільки ця температура нижча від заданої, то пара є перегрітою, причому перегрів складає

$$\Delta t_n = t - t_n = 210 - 164,96 = 45,04 \text{ °С}.$$

7.6.7. Визначити масу, внутрішню енергію, ентальпію, ентропію та інші параметри 100 м³ сухої насиченої пари, якщо вона має температуру 150 °С.

Розв'язання

За таблицею 13 (див. додатки) знаходимо: $p = 0,476$ МПа,
 $h'' = 2746$ кДж/кг, $s'' = 6,838$ кДж/(кг · К), $v'' = 0,3926$ м³/кг.

Маса пари

$$M = V/v'' = 100 / 0,3926 = 254,7 \text{ кг}.$$

$$H'' = M \cdot h'' = 254,7 \cdot 2746 = 700,2 \text{ МДж};$$

$$S'' = M \cdot s'' = 254,7 \cdot 6,838 = 1,74 \text{ МДж/К};$$

$$U'' = M \cdot (h'' - p \cdot v'') = 254,7 \cdot (2746 - 0,476 \cdot 10^3 \cdot 0,3926) = 651,8 \text{ МДж}.$$

7.6.8. На паропроводі сухої насиченої пари встановлено термометр, що показує температуру 190 °С. Визначити решту параметрів пари і які були б покази манометра на цьому паропроводі, якщо показ барометра $p_{\text{бар}} = 760$ мм рт. ст.

Розв'язання

За таблицею 13 (див. додатки) знаходимо: абсолютний тиск $p = 1,255$ МПа, $h'' = 2786$ кДж/кг, $v'' = 0,1564$ м³/кг, $s'' = 6,507$ кДж/(кг · К).

Покази манометра на паропроводі

$$p_{\text{надл.}} = p - p_{\text{бар}} = 1,255 \cdot 10^6 - \frac{765}{750} \cdot 10^5 = 11,53 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,153 \text{ МПа}.$$

Внутрішню енергію сухої насиченої пари при заданих параметрах обчислюємо за формулою

$$u'' = h'' - p \cdot v'' = 2786 - 1,255 \cdot 10^3 \cdot 0,1564 = 2589,7 \text{ кДж/кг}.$$

7.6.9. Визначити масу, питомий об'єм, ентальпію, ентропію, внутрішню енергію 200 м^3 води, що перебуває при тиску $p = 6$ бар і температурі $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

За таблицею 14 для води і перегрітої пари (див. додатки) знаходимо
 $v = 0,0010601 \text{ м}^3/\text{кг}$, $h = 503,7 \text{ кДж/кг}$, $s = 1,5265 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Маса води

$$M = V / v = 200 / 0,0010601 = 188,6 \text{ т.}$$

Внутрішня енергія для 200 м^3 води

$$U = M \cdot (i - p \cdot v) = 188,6 \cdot (503,7 - 6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0010601) = 94,9 \text{ МДж.}$$

Ентальпія

$$H = M \cdot h = 188,6 \cdot 503,7 = 95 \text{ МДж.}$$

Ентропія

$$S = M \cdot s = 188,6 \cdot 1,5265 = 287,9 \text{ кДж/К.}$$

7.6.10. Перегріта водяна пара має параметри: $p = 10$ бар, $t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити значення решти параметрів.

Розв'язання

За таблицею 14 для води і перегрітої пари (див. додатки) знаходимо
 $v = 0,2060 \text{ м}^3/\text{кг}$, $h = 2827 \text{ кДж/кг}$, $s = 6,692 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Внутрішня енергія пари

$$u = h - p \cdot v = 2827 - 10 \cdot 10^2 \cdot 0,2060 = 2621 \text{ кДж/кг.}$$

7.6.11. Користуючись h - s -діаграмою, визначите стан пари, її питомий об'єм, температуру, ентальпію, ентропію, якщо відомо, що її тиск $p = 1,5$ МПа, а ступінь сухості $x = 0,9$.

Розв'язання

Точка стану пари **1** знаходиться на перетині ізобари $1,5$ МПа (1500 кПа) і лінії сухості $x = 0,9$ (рис. 7.5). Як видно, точка **1** лежить у зоні вологої насиченої пари, що відповідає її стану.

Проеціюючи її відповідно на вісь ординат і вісь абсцис, знаходимо значення $h_1 = 2600 \text{ кДж/кг}$, $s_1 = 6,02 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Величина питомого об'єму визначається за значенням ізохори, яка проходить через точку **1**: $v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Якщо на діаграмі через дану точку лінія ізохори не проходить, то потрібно подумки провести ізохору через цю точку паралельно найближчій лінії ізохори, що нанесена на діаграмі, до перетину з лінією сухості $x = 1$, а оскільки над цією лінією є написи значень питомих об'ємів від $0,015$ до $60 \text{ м}^3/\text{кг}$, то легко визначити чисельне значення питомого об'єму ізохори, що проходить через дану точку.

Для визначення температури пари потрібно від точки **1** піднятися по ізобарі $p_1 = 1,5$ МПа до лінії сухості $x = 1$ і подивитися, яка ізотерма проходить через точку перетину ізобари p_1 і лінії сухості $x = 1$. Через точку **1** проходить ізотерма $t = 197 \text{ }^\circ\text{C}$; ця температура і є температурою вологої насиченої пари при тиску $p_1 = 1,5$ МПа.

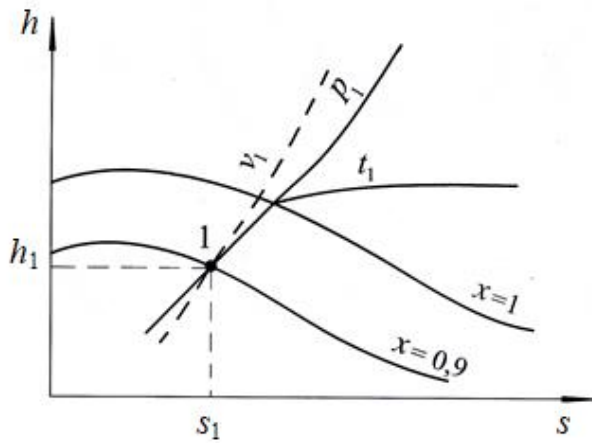


Рисунок 7.5 – Діаграма $h-s$ до прикладу 7.6.11

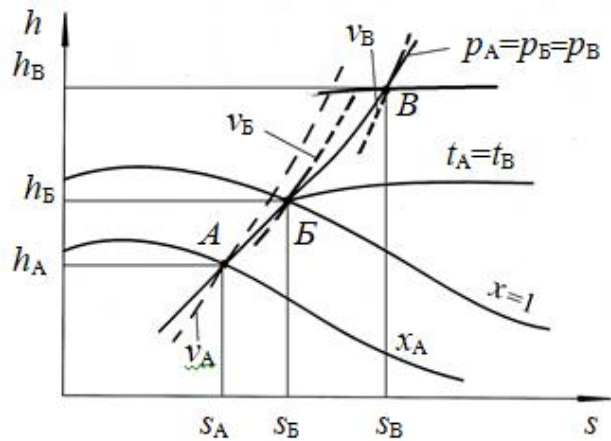


Рисунок 7.6 – Діаграма $h-s$ до прикладу 7.6.12

- 7.6.12.** Користуючись $h-s$ -діаграмою водяної пари, визначити ентальпію, ентропію, питомий об'єм, температуру і внутрішню енергію
- вологої насиченої пари при $p = 0,1$ МПа і $x = 0,85$;
 - сухої насиченої пари при $p = 0,1$ МПа;
 - перегрітої пари при $p = 0,1$ МПа і $t = 200$ °С.

Розв'язання

Відповідно до вихідних даних знаходимо точки на $h-s$ -діаграмі. Для вологої насиченої пари точка А (рис. 7.6) знаходиться на перетині ізобари $p_A = 0,1$ МПа і лінії сухості $x_A = 0,85$. Шукані параметри в точці А

$$h_A = 2340 \text{ кДж/кг}, \quad s_A = 6,44 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad v_A = 1,5 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad t_A = 100 \text{ }^\circ\text{С}.$$

$$u_A = h_A - p_A \cdot v_A = 2340 - 100 \cdot 1,5 = 2190 \text{ кДж/кг}.$$

Для сухої насиченої пари точку В знаходимо на перетині ізобари $p = 0,1$ МПа і лінії сухої насиченої пари $x = 1$ (див. рис. 7.6).

Шукані параметри в точці В

$$h_B = 2675 \text{ кДж/кг}, \quad s_B = 7,37 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad v_B = 1,73 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad t_B = t_A = 100 \text{ }^\circ\text{С}.$$

$$u_B = h_B - p_B \cdot v_B = 2675 - 100 \cdot 1,73 = 2502 \text{ кДж/кг}.$$

Стан перегрітої пари на $h-s$ -діаграмі визначатиметься точкою В на перетині ізобари $p_B = p_A = p_B = 0,1$ МПа та ізотерми $t = 200$ °С. Шукані параметри в точці В

$$h_B = 2875 \text{ кДж/кг}, \quad s_B = 7,82 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad v_B = 2,24 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$u_B = h_B - p_B \cdot v_B = 2875 - 100 \cdot 2,24 = 2651 \text{ кДж/кг}.$$

7.6.13. Задано стан вологої пари: $p = 0,5$ МПа, $x = 0,95$. Визначити решту параметрів, користуючись $h-s$ -діаграмою, і порівняти їх із значеннями цих параметрів, знайдених за допомогою таблиць водяної пари.

Розв'язання

На $h-s$ -діаграмі знаходимо точку 1 на перетині ізобари $p_1 = 0,5$ МПа і лінії ступеня сухості $x = 0,95$.

Шукані параметри в точці **1**

$$t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}, \quad v_1 = 0,34 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad s_1 = 6,59 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad h_1 = 2645 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Визначимо ці самі параметри за таблицею 12 (див. додатки) для насиченої пари з використанням відповідних формул (7.5, 7.7, 7.9). При тиску $p = 0,5 \text{ МПа}$ за таблицею знаходимо: $t_1 = 151,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $v'' = 0,3749 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v' = 0,0010927 \text{ м}^3/\text{кг}$,

$$h' = 640,1 \text{ кДж}/\text{кг}, \quad r = 2108,7 \text{ кДж}/\text{кг}, \quad s' = 1,8605 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad s'' = 6,8221 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Ентальпію пари визначаємо за формулою

$$h_1 = h_x = h' + r \cdot x = 640,1 + 2108,7 \cdot 0,95 = 2643 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Ентропію пари обчислюємо за формулою

$$s_1 = s_x = s' + \frac{r \cdot x}{T_H} = 1,8605 + \frac{2108 \cdot 0,95}{273 + 151,8} = 6,57 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Значення питомого об'єму знаходимо за формулою

$$v_1 = v_x = v'' \cdot x + (1 - x) \cdot v' = 0,3749 \cdot 0,95 + (1 - 0,95) \cdot 0,0010927 = 0,356 \text{ м}^3/\text{кг};$$

Порівняння параметрів, визначених за h - s -діаграмою і за таблицями з використанням відповідних формул, показує, що збіг їх значень цілком задовільний.

7.6.14. Вологу пару зі ступенем сухості $x = 0,85$ ізобарно перегрівають при $p_1 = 6 \text{ бар}$ до температури $t_2 = 400^\circ\text{C}$. Визначити всі параметри пари на початку і в кінці процесу та кількість витраченого тепла. Розв'язок показати на h - s -діаграмі.

Розв'язання

Точка початкового стану пари **1** перебуває на перетині ізобари 6 бар і лінії ступеня сухості $x = 0,85$ (рис. 7.7).

Тому що процес перегріву пари ізобарний, точка кінцевого стану пари **2** виступає як точка перетину ізобари $p = 6 \text{ бар}$ та ізотерми $t = 400^\circ\text{C}$. Для цих точок знаходимо: $h_1 = 2450 \text{ кДж}/\text{кг}$; $s_1 = 6,04 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $h_2 = 3275 \text{ кДж}/\text{кг}$; $s_2 = 7,72 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Питомі об'єми v_1 і v_2 визначають за ізохорами, які проходять через точки **1** і **2**: $v_1 = 0,27 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_2 = 0,52 \text{ м}^3/\text{кг}$. Для визначення температури вологої пари t_1 необхідно по ізобарі піднятися до $x = 1$ (у зоні вологої пари ізобара збігається з ізотермою) і визначити температуру $t_1 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ для ізобари $p = 6 \text{ бар}$.

Внутрішня енергія

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 2450 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^5 \cdot 0,27 = 2288 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг};$$

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 3275 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^5 \cdot 0,52 = 2963 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}.$$

Кількість витраченого тепла за формулою (табл. 7.1)

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 = 3275 - 2450 = 825 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Більш точно параметри пари на початку та в кінці процесу можуть бути визначені за таблицями водяної пари.

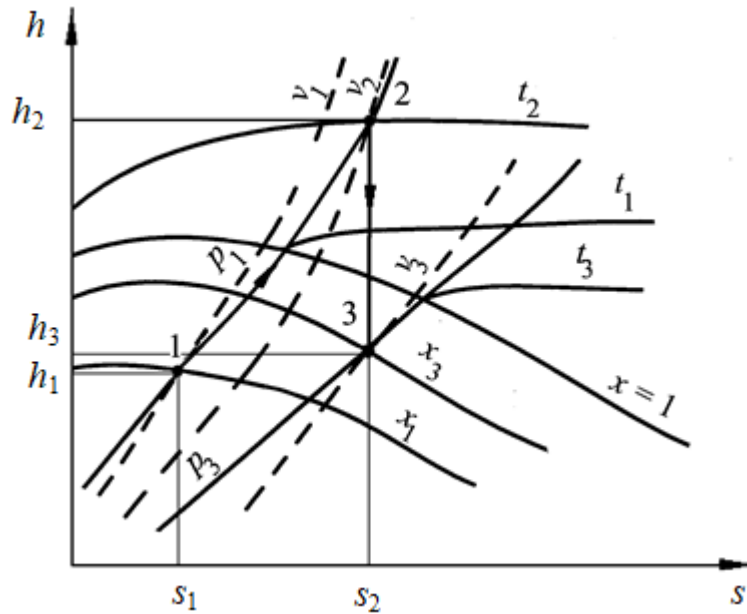


Рисунок 7.7 – Діаграма $h-s$ до прикладів 7.6.14 і 7.6.15

Знайдемо за заданих умов для точки **1** параметри за таблицею 12 (див. додатки) і за формулами (7.5, 7.7, 7.9)

$$h' = 670,6 \text{ кДж/кг}, v' = 0,0011 \text{ м}^3/\text{кг}, v'' = 0,3156 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = t_H = 158,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$r = 2086 \text{ кДж/кг}, s' = 1,931 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$v_1 = v_x = v'' \cdot x + (1 - x) \cdot v' = 0,3156 \cdot 0,85 + (1 - 0,85) \cdot 0,0011 = 0,268 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_1 = h_x = h' + r \cdot x = 670,1 + 2086 \cdot 0,85 = 2443,7 \text{ кДж/кг};$$

$$u_1 = u_x = h_x - p \cdot v_x = 2443,7 - 6 \cdot 10^2 \cdot 0,268 = 2283 \text{ кДж/кг};$$

$$s_1 = s_x = s' + \frac{r \cdot x}{T_H} = 1,931 + \frac{2086 \cdot 0,85}{273 + 158,8} = 6,04 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Для точки **2** параметри перегрітої пари визначаємо з таблиці 14 (див. додатки)

$$h_2 = 3273 \text{ кДж/кг}, v_2 = 0,5237 \text{ м}^3/\text{кг}, s_2 = 7,719 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 3273 - 6 \cdot 10^2 \cdot 0,5237 = 2958,8 \text{ кДж/кг},$$

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 = 3279 - 2443,7 = 829,3 \text{ кДж/кг}.$$

7.6.15. Перегріта пара (див. приклад 7.6.14) при $p_2 = 6$ бар і $t_2 = 400$ °С адіабатно розширюється до $p_3 = 0,1$ бар. Користуючись діаграмою, визначити параметри пари наприкінці процесу, роботу й зміну внутрішньої енергії.

Розв'язання

Визначення параметрів на початку адіабатного процесу показано в прикладі 4 (точка **2**, див. рис. 7.7). Адіабатний процес буде зображуватися вертикальною лінією ($s = const$) до перетину з ізобарою $p_3 = 0,1$ бар. Точка **3** характеризує кінцевий стан пари, для якої $x_3 = 0,94$ і $h_3 = 2480$ кДж/кг. Температура пари в точці **3** визначається ізотермою, що проходить через цю точку, тобто лінією ізотерми, яка проходить через точку перетину ізобари 0,1 бар із прикордонною кривою $x = 1$: $t_3 = 45$ °С. Питомий об'єм v_3 визначається за ізохорою, що проходить через точку **3**: $v_3 = 14$ м³/кг.

Зміна внутрішньої енергії в адіабатному процесі (див. табл. 7.1)
 $\Delta u_{2-3} = (h_3 - p_3 \cdot v_3) - (h_2 - p_2 \cdot v_2) = (2480 \cdot 10^3 - 0,1 \cdot 10^5 \cdot 14) - (3275 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^5 \cdot 0,52) = -623 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}$

Робота в процесі

$$l_{2-3} = -\Delta u_{2-3} = 623 \text{ кДж/кг.}$$

7.6.16. 1 кг сухої насиченої пари при тиску 1 МПа перегрівається на 200 °С. Визначити за h - s -діаграмою всі параметри пари в кінці й на початку ізохорного процесу, кількість підведеного тепла і зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес в h - s і T - s -координатах.

Розв'язання

Знаходимо за h - s -діаграмою на перетині лінії сухої насиченої пари $x = 1$ та ізобари $p_1 = 1$ МПа точку **1** (рис. 7.8), що характеризує початковий стан пари, якій відповідає: $h_1 = 2780$ кДж/кг, $v_1 = 0,20$ м³/кг,

$$s_1 = 6,6 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, t_1 = 179 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Ізохорний процес буде зображуватись пунктирною лінією до перетину з ізотермою $t_2 = t_1 + \Delta t = 179 + 200 = 379$ °С. Точка **2** характеризує кінцевий стан пари, для якої $h_2 = 3235$ кДж/кг, $p_2 = 1,5$ МПа, $v_2 = v_1 = 0,20$ м³/кг, $s_2 = 7,3$ кДж/(кг·К).

Зміна внутрішньої енергії в процесі **1 – 2** (рис. 7.8)

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - v \cdot (p_2 - p_1) = 3235 - 2780 - 0,2 \cdot (1,5 \cdot 10^3 - 10^3) = 355 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота в процесі **1 – 2** (рис. 7.9)

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} = 355 \text{ кДж/кг.}$$

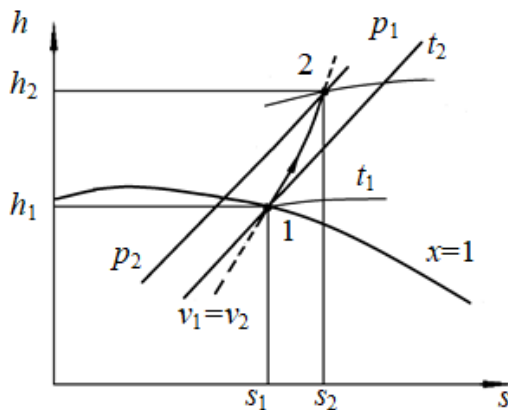


Рисунок 7.8 – h - s -Діаграма прикладу 7.6.16

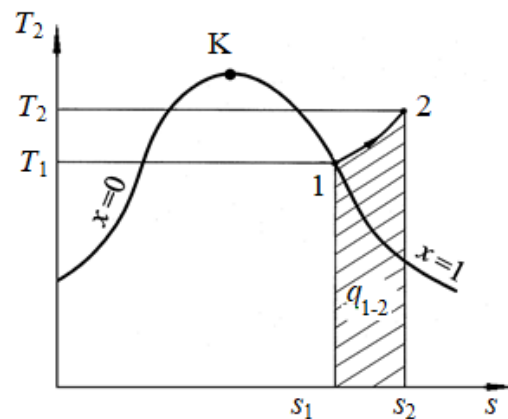


Рисунок 7.9 – T - s -Діаграма до прикладу 7.6.16

7.6.17. 15 кг водяної пари з початковим тиском 0,3 МПа і температурою 200 °С ізотермічно стискується (охолоджується) до стану вологої насиченої пари з паровмістом 90 % ($x = 0,9$). Визначити роботу стиснення, зміну внутрішньої енергії і кількість відведеного тепла. Зобразити процес у p - v , T - s , h - s -координатах.

Розв'язання

Знаходимо за h - s -діаграмою на перетині ізобари $p_1 = 1$ МПа і ізотерми $t_1 = 200$ °С точку **1** (рис. 7.10, а), яка характеризує початковий стан, якому відповідають параметри: $h_1 = 2870$ кДж/кг, $v_1 = 0,72$ м³/кг, $s_1 = 0,72$ кДж/(кг · К).

Ізотермічний процес зображатиметься ізотермою 200 °С до перетину із лінією ступеня сухості $x = 0,9$ (див. рис. 7.10, а). У зоні вологої пари ізотерма 200 °С збігається з ізобарою $p_2 = 1,5$ МПа. Точка **2** характеризує кінцевий стан пари, для якої: $h_2 = 2600$ кДж/кг, $v_2 = 0,115$ м³/кг, $s_2 = 6,015$ кДж/(кг · К).

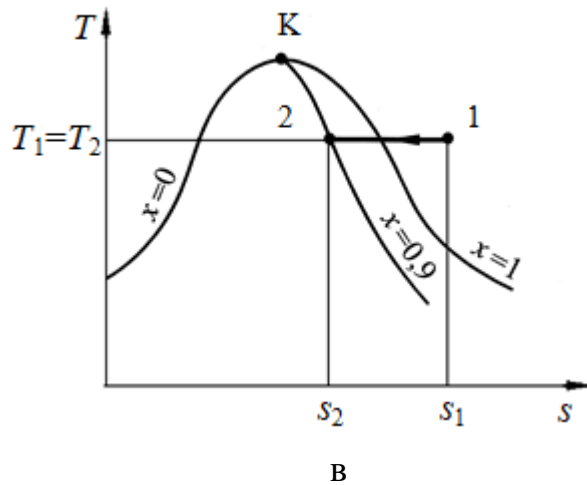
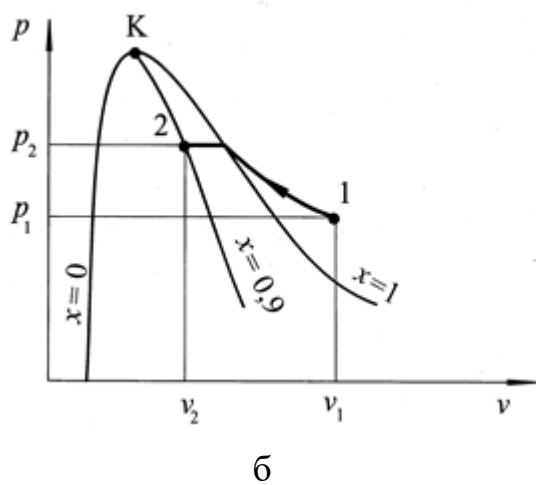
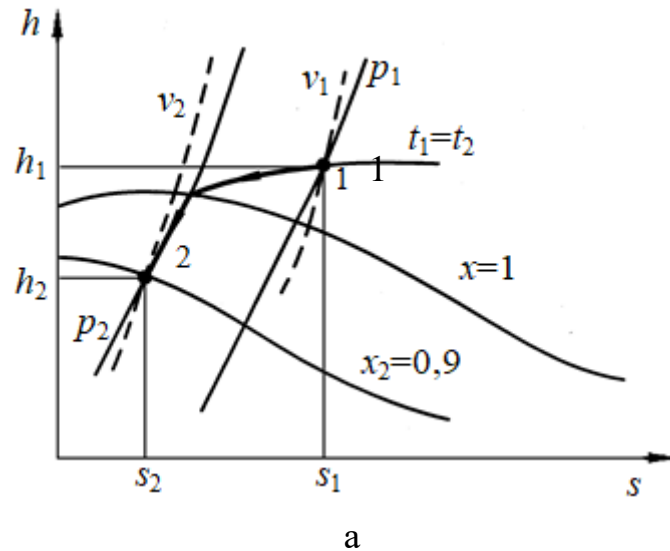


Рисунок 7.10 – Діаграми до прикладу 7.6.17:

а – в h - s -координатах; б – в p - v -координатах; в – в T - s -координатах

Зміна внутрішньої енергії в процесі **1 – 2** (рис. 7. 10, а)

$$\Delta u_{1-2} = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1) = (2600 - 1,5 \cdot 10^3 \cdot 0,115) - (2870 - 0,3 \cdot 10^3 \cdot 0,72) = -227 \text{ кДж/кг.}$$

$$\Delta U_{1-2} = M \cdot \Delta u_{1-2} = 15 \cdot (-227) = -3405 \text{ кДж.}$$

Кількість відведеного тепла в процесі **1 – 2** (рис. 7.10, в)

$$q_{1-2} = T_1 \cdot (s_2 - s_1) = (273 + 200) \cdot (6,015 - 7,32) = - 617 \text{ кДж/кг.}$$

$$Q_{1-2} = M \cdot q_{1-2} = 15 \cdot (- 617) = - 9259 \text{ кДж.}$$

Робота стиснення в процесі **1 – 2** (рис. 7.10, б)

$$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} = - 617 - (-227) = - 390 \text{ кДж/кг;}$$

$$L_{1-2} = M \cdot l_{1-2} = 15 \cdot (- 390) = - 5850 \text{ кДж.}$$

7.6.18. 1 кг насиченої пари при тиску 0,8 МПа і паровмістом 80 % ($x = 0,8$) розширюється ізотермічно до тиску 0,1 МПа. Подальшим процесом адіабатного розширення пара приводиться до стану сухої насиченої. Визначити всі параметри на початку і в кінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і тепло. Зобразити процеси зміни стану в p - v , T - s , h - s -координатах.

Розв'язання

Знаходимо за h - s -діаграмою на перетині ізобари $p_1 = 0,8$ МПа і лінії ступеня сухості $x = 0,8$ точку **1** (див. рис. 7.11, в), що характеризує початковий стан, якому відповідають параметри пари: $h_1 = 2360$ кДж/кг; $v_1 = 0,20$ м³/кг; $s_1 = 5,72$ кДж/(кг·К); $t_1 = 180$ °С.

Ізотермічний процес розширення у зоні вологої пари з точки **1** йтиме за ізобарою $p_1 = 0,8$ МПа до прикордонної кривої $x = 1$, а далі у зоні перегрітої пари за ізотермою $t_1 = 180$ °С до перетину з ізобарою $p_1 = 0,1$ МПа. Точка **2**

характеризує кінцевий стан пари в ізотермічному процесі розширення, для якого

$$h_2 = 2875 \text{ кДж/кг, } v_2 = 2,1 \text{ м}^3/\text{кг, } s_2 = 7,22 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К), } t_2 = t_1 = 180 \text{ °С.}$$

Адіабатний процес зображатиметься вертикальною лінією ($s = const$), що починається з точки **2** і до перетину з прикордонною кривою $x = 1$. Точка **3** характеризує кінцевий стан пари, для якої

$$h_3 = 2360 \text{ кДж/кг, } v_3 = 0,20 \text{ м}^3/\text{кг, } s_3 = s_2 = 7,22 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К), } t_3 = 73 \text{ °С, } p_3 = 0,036 \text{ МПа.}$$

Обчислимо шукані величини для даних процесів

ізотермічний процес **1 – 2**

$$\Delta u_{1-2} = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1) = (2875 - 100 \cdot 2,1) - (236 - 800 \cdot 0,2) = 465 \text{ кДж/кг;}$$

$$q_{1-2} = T_1 \cdot (s_2 - s_1) = (273 + 180) \cdot (7,22 - 5,72) = 679,5 \text{ кДж/кг;}$$

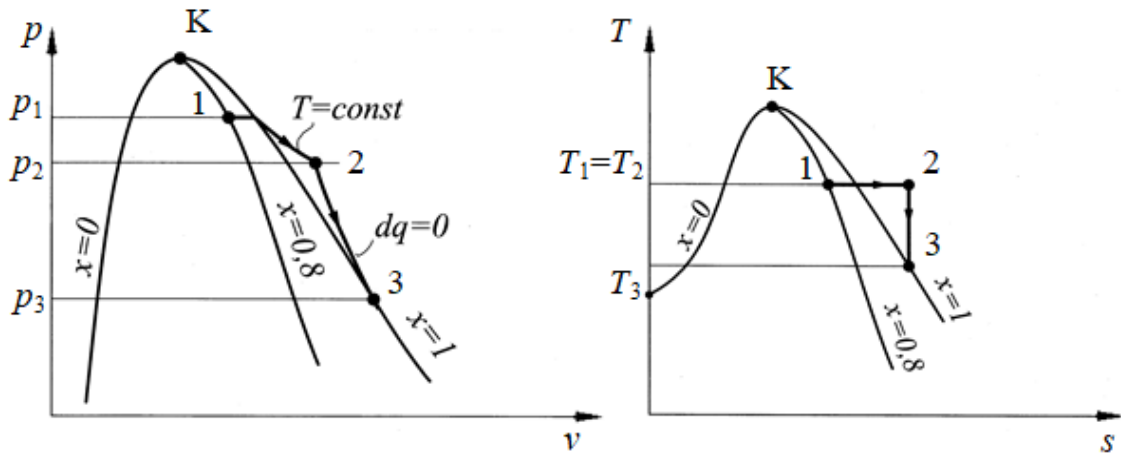
$$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} = 679,5 - 465 = 214,5 \text{ кДж/кг;}$$

адіабатний процес **2 – 3**

$$\Delta u_{2-3} = (h_3 - p_3 \cdot v_3) - (h_2 - p_2 \cdot v_2) = (2640 - 36 \cdot 4,35) - (2875 - 100 \cdot 2,1) = - 181,6 \text{ кДж/кг;}$$

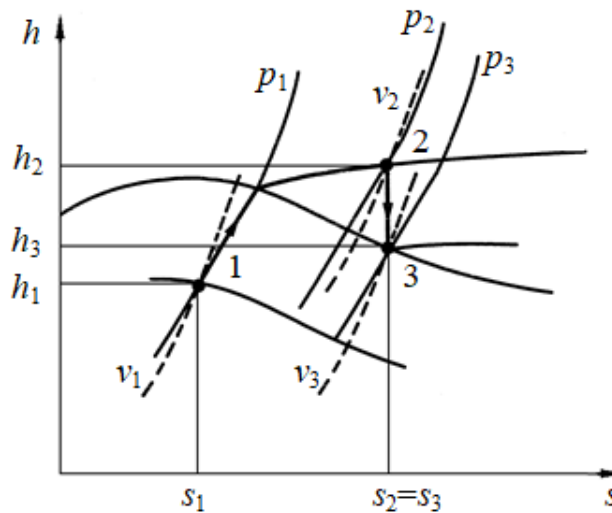
$$q_{2-3} = 0;$$

$$l_{2-3} = - \Delta u_{2-3} = 181,6 \text{ кДж/кг.}$$



а

б



в

Рисунок 7.11 – Графіки ізотермічного й адіабатного процесів:
а – в p - v -координатах; б – в T - s -координатах ; в – в h - s -координатах

7.7. Задачі

а) Визначення стану і параметрів водяної пари

Вихідні дані для розв'язування задач наведено у табл. 7.2.

7.7.1. Воду, що перебуває в посудині під тиском p_1 , нагріто до температури t_1 . Чи настало при цьому кипіння води?

7.7.2. На паропроводі насиченої пари встановлено термометр, що показує температуру t_1 . Яким при цьому може бути показ манометра на даному паропроводі?

7.7.3. Визначити стан водяної пари, якщо її тиск дорівнює p_1 , а температура t_2 .

7.7.4. Обчислити стан водяної пари, якщо її тиск дорівнює p_1 , а питомий об'єм v .

7.7.5. Визначити стан водяної пари, якщо її тиск дорівнює p_1 , а ентропія s .

7.7.6. Обчислити питомий об'єм вологої пари, якщо відомі значення її тиску h_1 і ступінь сухості x .

7.7.7. Знайти масу пари об'ємом $V \text{ м}^3$, якщо її тиск дорівнює p_1 , а ступінь сухості x .

7.7.8. Волога насичена пара має початкові параметри p_1, x . Визначити ентальпію і внутрішню енергію пари.

7.7.9. Насичена водяна пара, тиск якої дорівнює p_1 , а ступінь сухості x , міститься у резервуарі об'ємом V . Визначити масу, внутрішню енергію та ентальпію пари.

Таблиця 7.2

Остання цифра шифру	p_1 , МПа	T_1 , °С	t_2 , °С	$t_{в,}$ °С	$t_{п,}$ °С	v , м ³ /кг	Передостання цифра шифру	V , м ³	s , (кДж/кг·К)	x	M , кг	η
0	0,15	111	130	20	150	1,16	0	5,5	7,2	0,95	2,5	0,85
1	0,12	105	110	25	140	1,11	1	6,8	6,3	0,87	4,1	0,91
2	0,29	130	132	17	180	0,55	2	10,5	7,0	0,85	5,0	0,90
3	0,25	127	150	18	145	2,35	3	15,4	8,9	0,83	10,0	0,86
4	0,14	109	170	23	200	0,95	4	20,5	8,5	0,85	12,0	0,88
5	0,18	100	117	28	155	1,64	5	12,0	5,4	0,85	4,5	0,95
6	0,32	102	136	30	190	0,36	6	16,1	3,5	0,81	3,8	0,83
7	0,71	165	140	15	230	0,56	7	17,1	6,7	0,84	7,1	0,87
8	0,51	145	170	24	210	0,37	8	1,9	2,3	0,94	6,3	0,93
9	0,60	159	110	16	250	0,32	9	7,3	8,3	0,81	8,5	0,97

7.7.10. Обчислити кількість теплоти, яка витрачається на перегрівання 1 кг води до стану вологої пари, якщо тиск її дорівнює p_1 , а ступінь сухості x . Початкова температура води становить $t_{в}$.

7.7.11. Визначити кількість теплоти, яка витрачається на перегрівання 1 кг вологої пари, якщо тиск її дорівнює p_1 , а ступінь сухості x , до температури $t_{п}$.

7.7.12. Визначити кількість теплоти, яку необхідно підвести до води масою M кг, щоб вона закипіла; при цьому початкова температура води дорівнює $t_{в}$, а тиск p_1 .

7.7.13. Через пароперегрівник парового котла за годину проходить пара масою M кг. Ступінь сухості пари до моменту потрапляння в пароперегрівник дорівнює x , а тиск p_1 . Температура пари після виходу з пароперегрівника становить $t_{п}$. Обчислити кількість теплоти, сприйнятої пароперегрівником, допускаючи, що ККД дорівнює η .

б) Процеси зміни стану водяної пари

Вихідні дані для розв'язування задач наведено в табл. 7.3

7.7.14. Визначити кількість теплоти, яку потрібно витратити, нагріваючи водяну пару масою M кг та об'ємом V і ступенем сухості x_1 , щоб підвищити її температуру до t_1 , при цьому $V = const$. Обчислити також початкову температуру пари та зміну внутрішньої енергії.

7.7.15. Пара об'ємом $V \text{ м}^3$, тиск якої дорівнює p_1 , а температура t_2 , охолоджується, не змінюючи об'єму, до t_1 . Визначити кількість теплоти, яку віддає пара, та зміну внутрішньої енергії. Побудувати графік парового процесу в координатах $h-s$.

Таблиця 7.3

Остання цифра шифру	p_1 , МПа	p_2 , МПа	t_1 , °С	t_2 , °С	v , м ³ /кг	Передостання цифра шифру	M , кг	V , м ³	x_1	x_2	y	Q , кДж
0	0,5	1,6	151	200	0,52	0	7,8	5,5	0,82	0,91	0,15	230
1	1,3	1,9	210	280	0,21	1	10	5,6	0,83	0,94	0,14	500
2	1,2	2,1	187	250	0,61	2	7,5	7,0	0,85	0,93	0,18	540
3	0,4	1,8	160	230	0,55	3	4,5	4,4	0,81	0,95	0,12	630
4	0,3	1,9	150	190	0,68	4	14	2,8	0,85	0,99	0,17	780
5	1,6	3,5	240	310	0,38	5	3,5	3,5	0,86	0,97	0,16	750
6	1,1	2,4	195	240	0,31	6	6,5	5,3	0,88	0,97	0,18	430
7	1,5	2,6	200	390	0,19	7	8,3	8,1	0,83	0,94	0,17	810
8	0,6	3,0	190	260	0,45	8	4,8	9,5	0,88	0,99	0,20	205
9	0,2	1,7	120	160	1,60	9	3,1	4,5	0,87	0,96	0,18	350

7.7.16. Волога пара має ступінь сухості x_1 при тиску p_1 . Яку кількість теплоти потрібно витратити, щоб перевести вологу пару масою M кг при сталому тиску в суху насичену пару. Визначити також зміну внутрішньої енергії пари. Показати графічно процес в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.17. Водяна пара масою M кг, тиск якої дорівнює p_1 , а температура t_1 , не змінюючи тиску, нагрівається до температури t_2 . Визначити стан пари, її параметри, витрачену в процесі нагрівання кількість теплоти, роботу розширення та зміну внутрішньої енергії. Показати графічно процес в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.18. Водяна пара об'ємом $V \text{ м}^3$, тиск якої становить p_1 , а ступінь сухості x_1 , розширюється до ступеня сухості x_2 , при цьому $p = const$. Обчислити кінцеві параметри, кількість теплоти, що бере участь у процесі, роботу і зміну внутрішньої енергії. Зобразити графік процесу в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.19. Водяна пара масою M кг, тиск якої становить p_1 , а ступінь сухості x_1 , розширюється ізотермічно таким чином, що наприкінці процесу вона стає сухою насиченою. Визначити кількість теплоти, яка передається парі, зроблену при цьому роботу та зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.20. Пара масою M кг, початковий стан якої характеризується температурою t_1 і тиском p_1 , стискується ізотермічно таким чином, що від неї відводиться кількість теплоти Q . Обчислити тиск наприкінці стиснення, зміну внутрішньої енергії і роботу процесу. Показати процес графічно в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.21. Волога пара об'ємом $V \text{ м}^3$, ступінь сухості якої становить x_2 , розширюється адіабатично від величини p_2 до p_1 . Визначити її параметри наприкінці розширення і зроблену при цьому роботу. Показати процес графічно в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.22. Водяна пара масою M кг, температура якої становить t_1 , а ступінь сухості x_1 , стискується адіабатично до величини p_2 . Визначити її кінцеві параметри, роботу стиснення і зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$ і $h-s$.

7.7.23. Водяна пара масою M кг, тиск якої становить p_1 , а температура t_2 , адіабатично розширюється до величини x_1 , після чого ізотермічно підігрівається до ступеня сухості x_2 . Визначити стан пари і відсутні параметри на початку і в кінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість витраченого при цьому тепла. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $h-s$.

7.7.24. Водяна пара масою M кг, температура якої становить t , а тиск p_1 , охолоджується ізохорно до ступеня сухості x_2 , після чого адіабатично розширюється до ступеня вологості y . Визначити стан пари і відсутні параметри на початку і в кінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, обчислити роботу і кількість витраченого при цьому тепла. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $h-s$.

7.7.25. Водяна пара масою M кг, ступінь сухості якої становить x_2 , а тиск p_2 , розширюється ізотермічно до значення тиску p_1 , після чого адіабатно розширюється до ступеня сухості x_1 . Визначити стан пари та її основні параметри на початку і в кінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, обчислити роботу і кількість витраченого при цьому тепла. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $h-s$.

7.7.26. Водяна пара масою M кг, ступінь сухості якої становить x_1 , а тиск p_2 , підігрівається ізохорно до ступеня сухості x_2 , після чого ізотермічно розширюється до величини тиску p_1 . Визначити стан пари та її основні параметри на початку і в кінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, обчислити роботу і кількість витраченого при цьому тепла. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $h-s$.

7.7.27. Суха насичена пара перегрівается при величині сталого тиску p_1 до температури t_2 , потім розширюється ізентропно (адіабатично) до стану вологої пари із ступенем вологості y . Обчислити кількість теплоти перегрівання, зміну внутрішньої енергії та ентальпії в цих процесах. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $h-s$.

7.7.28. Суха насичена пара, тиск якої становить p_1 , стискується адіабатично до величини p_2 . Визначити кінцеву температуру, роботу процесу. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $i-s$.

7.7.29. Водяна пара, тиск якої дорівнює p_1 , а температура t_2 розширюється ізентропно до сухого насиченого стану, а потім охолоджується, не змінюючи об'єму до ступеня сухості x_2 . Обчислити роботу в кожному з процесів, кількість теплоти і зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес графічно в координатах $p-v$, $T-s$ та $i-s$.

8. ТЕРМОДИНАМІКА ВИТІКАННЯ ТА ДРОСЕЛЮВАННЯ ГАЗІВ І ПАРІВ

Викладено короткі теоретичні відомості про види газових потоків та рівняння їх нерозривності; перший закон термодинаміки для потоку газу та основні форми його запису; закономірності витікання газу через звужувальне сопло; комбіноване сопло Лаваля – призначення, будова, особливості витікання газу; вплив тертя на параметри газу при його витіканні; витікання реальних газів і пари; дроселювання газів і пари; змішування газових потоків.

Мета – сформулювати знання про основні закони термодинаміки потоку газу та пари і вміння застосовувати їх при розрахунках процесів витікання з сопел та процесу дроселювання.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- визначати параметри газових і парових потоків при їх витіканні;
- застосовувати закони термодинаміки потоку газу та пари при розрахунках процесів витікання з сопел;
- застосовувати закони термодинаміки потоку газу та пари при розрахунках процесу дроселювання.

8.1. Основні рівняння процесів течії

Процес течії газів у каналах різної форми зустрічається при проектуванні парових і газових турбін, компресорів, реактивних двигунів, холодильних машин. Розрахунок таких процесів базується на основних рівняннях газової динаміки і основних законів термодинаміки. Застосування цих рівнянь і законів дозволяє визначити значення швидкостей і масової витрати газу у будь-якому перетині каналу.

Витіканням називається процес прискореного руху газу крізь відносно короткі канали особливої форми – сопла, в яких відбувається спад тиску. В соплах рух робочого тіла відбувається швидко, і тому теплообмін між тілом і стінками каналу незначний. Унаслідок цього, процес витікання робочого тіла із сопел можна вважати адіабатним.

Конструкції сопел, які пристосовуються в технічних установках наведені на рис. 8.1.

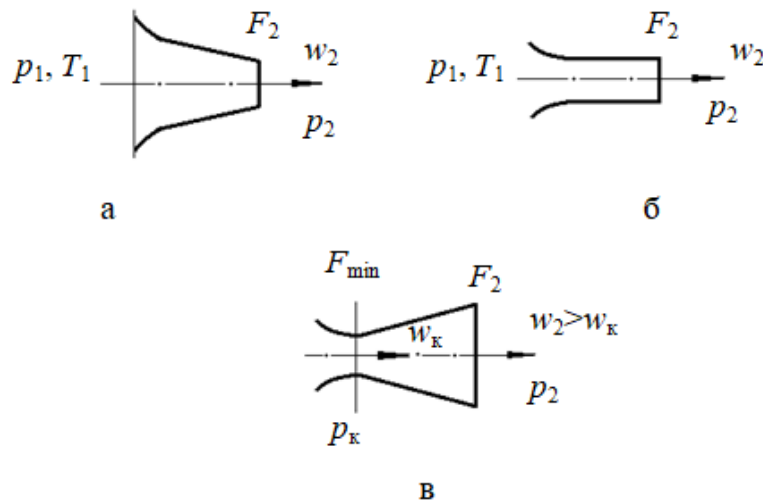


Рисунок 8.1 – Конструкції сопел:

а – сопло, що звужується; б – циліндричне сопло; в – комбіноване сопло Лаваля

При витікання газу із сопла, що звужується (рис. 8.1, а) і циліндричного сопла (рис. 8.1, б) можна одержати максимальну швидкість рівної швидкості поширення звуку, тобто перевищення швидкості звуку у таких соплах неможливо.

Надзвукову швидкість витікання потоку можна одержати в комбінованих соплах (рис. 8.1, в).

Для одержання формул, за допомогою яких визначається швидкість і масова витрати газу, використовуються рівняння першого закону термодинаміки для термодинамічної системи, що рухається в просторі (3.9) і рівняння нерозривності потоку

$$M = \frac{F \cdot \omega}{v}, \quad (8.1.)$$

де F – поперечний перетин каналу, по якому рухається потік, m^2 ;
 ω – швидкість потоку, m/s ; v – питомий об’єм речовини, m^3/kg .

Для адіабатного процесу течії газу в каналах, рис. 8.2, при відомих припущеннях, в теорії термодинаміки перший закон одержано у такому вигляді [7]

$$h_1 - h_2 = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}, \quad (8.2.)$$

де ω – швидкість потоку, m/s ; v – питомий об’єм речовини, m^3/kg .

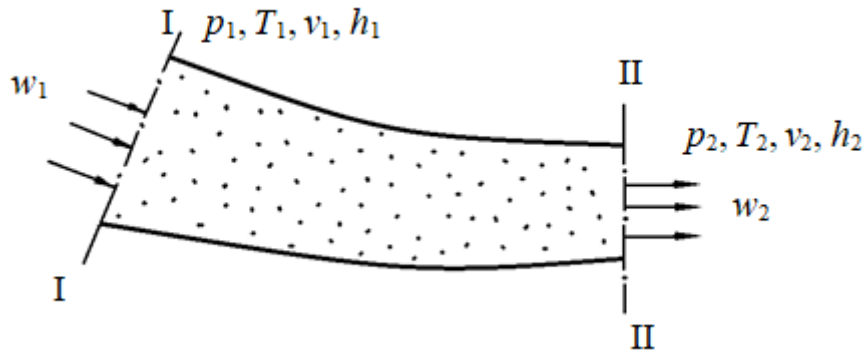


Рисунок 8.2 – Схема руху робочого тіла в каналі змінного перетину

При виведенні рівняння першого закону термодинаміки для потоку, прийнято, що параметри потоку в перетині I-I – p_1, v_1, T_1, h_1 , а в перетині II-II – p_2, v_2, T_2, h_2 , при цьому $p_1 > p_2$ і внаслідок перепаду тиску в каналі відбувається переміщення речовини. Одержана формула для визначення швидкості ω_2 на виході із сопла

$$\omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{h_2 - h_1}, \text{ м/с} \quad (8.3)$$

Після простих перетворень рівняння (8.3), з використанням рівнянь для ідеального газу, одержані формули для визначення швидкості і витрати газу із сопла при заданих параметрах потоку

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (8.4)$$

$$M = F_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (8.5)$$

З рівнянь (8.4, 8.5) випливає, що для даного газу і заданих p_1, T_1, F_2 швидкість ω_2 і витрата M залежить тільки від відношення тиску $\frac{p_2}{p_1}$, яке в термодинаміці позначається через β , тобто від тиску у зовнішньому просторі p_2 (тиск p_1 в розрахунку приймається сталим), куди витікає газ. Ця залежність масової витрати газу показана графічно на рис. 8.3. для інтервалу зміни перепаду тиску β від 0 до 1.

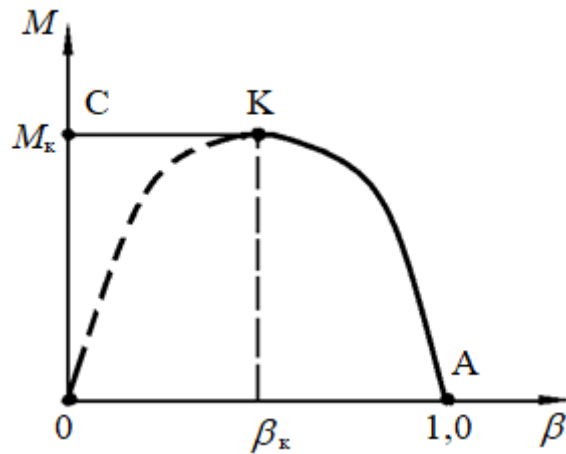


Рисунок 8.3 – Залежність витрати при витіканні газу від перепаду тиску β

З рис. 8.3. видно, що при зменшенні перепаду від $\beta = 1$ до $\beta = \beta_k$ витрата газу зростає від $M = 0$ при $\beta = 1$, до $M = M_k$ при $\beta = \beta_k$ (крива АК). При подальшому зниженні перепаду тиску від β_k до $\beta = 0$ зміни витрати газу M відповідають на графіку ділянці кривої К-О і К-С. Ділянка К-О одержана з теоретичної залежності (8.5), а ділянка К-С відповідає справжньої витрати.

Досліди з витікання газу через сопла, що звужуються, і циліндричні сопла показують, що швидкість потоку на виході із сопел досягають максимальних значень (M_k і ω_k) і залишаються постійними при досягненні $\frac{p_2}{p_1} = \beta_k$.

Відношення $\frac{p_2}{p_1}$, при якому досягається максимальна швидкість і витрата, називається критичним відношенням і позначається через β_k , а тиск p_2 – критичним тиском p_k . Критичне відношення тисків $\frac{p_2}{p_1}$ визначається за формулою

$$\beta_k = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (8.6)$$

Для одноатомних газів ($k = 1,66$) $\beta_k = 0,489$; для двоатомних ($k = 1,4$) $\beta_k = 0,528$; для триатомних ($k = 1,29$) і перегрітої пари $\beta_k = 0,546$.

Швидкість витікання ω_k , що відповідає критичному відношенню тисків β_k , називається критичною швидкістю і визначається по формулі

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1}, \quad (8.7)$$

Максимальну витрату газу можна визначити, якщо в рівняння (8.5) замість $\frac{p_2}{p_1} = \beta$ підставити значення β_k з формули (8.6)

$$M_k = \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot k \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1}} \quad (8.8)$$

Прийнято називати процес витікання речовини з сопел в інтервалі зміни перепаду тиску $\beta_k < \beta < 1$ докритичним режимом і для інтервалу $0 < \beta < \beta_k$ надкритичним режимом витікання [7].

8.2. Методика розрахунку витікання ідеального газу

Розрахунок процесів витікання речовини з сопла починається з визначення характеру режиму витікання по вихідним даним (p_1, p_2) , для чого обчислюється значення β і порівнюється з β_k . В залежності від режиму витікання розраховується ω_2 і M по відповідним формулам для заданої конструкції сопла.

8.2.1. Витікання ідеального газу через звужувальне сопло і циліндричне сопло

Докритичний режим ($\beta_k < \beta < 1, p_2 > p_k$)

В цьому випадку відбувається повне розширення газу, швидкість газу на виході із сопла менше швидкості звуку. Швидкість витікання ω_2 визначається по формулі (8.4), а витрати газу за формулою (8.5)

Критичний режим витікання ($\beta = \beta_k, p_2 = p_k$)

Швидкість витікання і масова витрата газу досягають максимальних значень ω_k і M_k (див. рис. 8.3) і розраховуються за формулами (8.7) і (8.8) відповідно.

Надкритичний режим витікання ($\beta < \beta_k, p_2 < p_k$)

В цьому випадку відбувається не повне розширення газу. Часткове розширення газу відбувається при зміні тиску від p_1 до p_k (див. рис. 8.4)

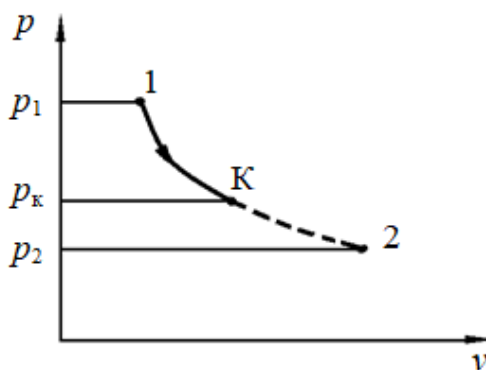


Рисунок 8.4 – Графічне зображення адіабатного процесу розширення газу при витіканні через сопло, що звужується

Швидкість і витрата газу залишаються максимальними, але не більше ω_k і M_k (див. рис. 8.3) і визначаються за формулами (8.7) і (8.8) відповідно.

8.2.2. Витікання ідеального газу через комбіноване сопло Лаваля

Сопло Лаваля призначається для використання великих перепадів тиску ($\beta \ll \beta_k$) для одержання швидкостей витікання, які перевищують критичну або швидкість звуку.

При витіканні газу з комбінованого сопла в навколишнє середовище з тиском менше критичного в самому вузькому перетині F_{\min} (див. рис. 8.1, в) встановлюється критичний тиск p_k і критична швидкість ω_k . В розширюючій насадці відбувається подальше збільшення швидкості газу і зниження тиску до тиску p_2 , а витрата газу не змінюється і дорівнює M_k .

Швидкість витікання і масова витрата газу, при заданих даних, на виході з сопла визначаються за формулами (8.4) і (8.5), а p_k з виразу

$$p_k = p_1 \cdot \beta_k. \quad (8.9)$$

8.3. Методика розрахунку реального газу (водяної пари)

Для водяної пари, як і для ідеального газу при розрахунку процесу витікання речовини задаються вихідні дані (p_1, T_1, F_2, p_2 або інші), потім визначається режим витікання, для чого розраховується β і порівнюється з β_k .

Розрахунок швидкості і масової витрати водяної пари найбільш доцільно виконувати за допомогою $h-s$ діаграми, використовуючи рівняння (8.3), (8.1) [7].

8.3.1. Витікання реального газу через звужувальне сопло і циліндричне сопло

Докритичний режим

За цих умов, як було вказано вище, відбувається повне розширення пари і тиск на виході з сопла знижується від p_1 до p_2 . Швидкість витікання і масова витрати визначаються за такими рівняннями:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2}, \text{ м/с,} \\ M &= \frac{F_2 \cdot \omega_2}{v_2}, \text{ кг/с.} \end{aligned} \quad (8.10)$$

Критичний режим ($\beta = \beta_k, p_2 = p_k$)

$$\omega_2 = \omega_k = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_k}, \quad (8.11)$$

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_k}{v_k}. \quad (8.12)$$

Надкритичний режим витікання ($\beta < \beta_k, p_2 < p_k$)

$$\omega_k = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_k},$$

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_k}{v_k}$$

Для визначення ω_k і v_k за допомогою $h-s$ діаграми треба визначити критичний тиск $p_k = p_1 \cdot \beta_k$ (для водяної пари $\beta_k = 0,546$) (рис. 8.5).

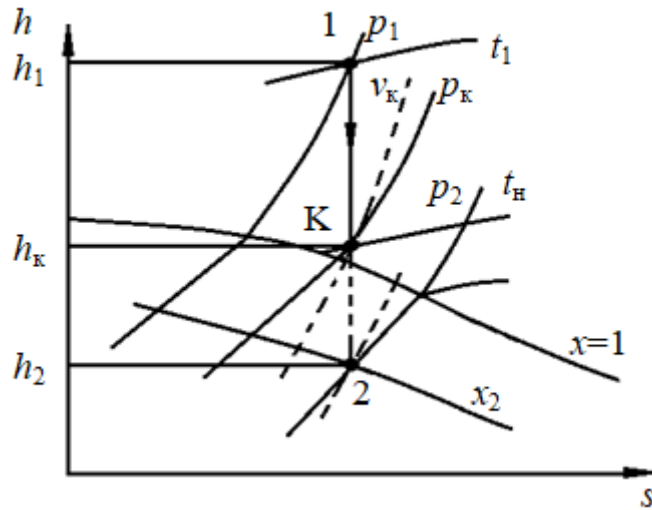


Рисунок 8.5 – Процеси адиабатного розширення водяної пари в соплі, що звужується, при надкритичному режимі витікання

8.3.2. Витікання реального газу через комбіноване сопло Лаваля

$$\omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2}, \text{ м/с}$$

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_2}{v_2},$$

де F_2 – площа перерізу на виході з комбінованого сопла (див. рис. 8.1,в), якщо в вихідних даних задана площа мінімального перетину сопла F_{\min} , то витрату пари треба розрахувати по формулі

$$M = \frac{F_{\min} \cdot \omega_k}{v_k}. \quad (8.13)$$

Графічне зображення процесу витікання водяної пари з сопла Лаваля подано на рис. 8.6.

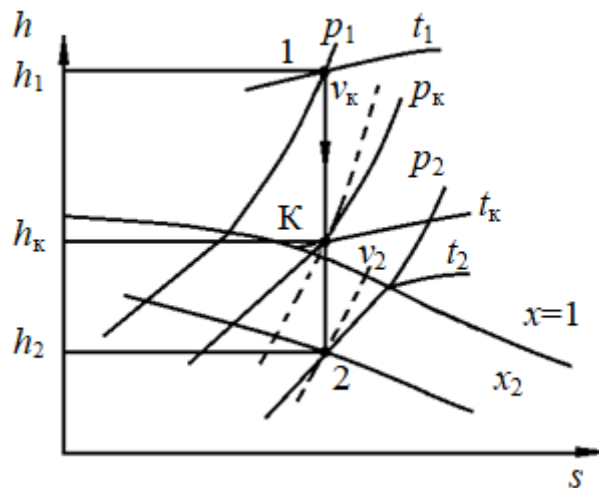


Рисунок 8.6 – Процес адіабатного розширення водяної пари при витіканні з сопла Лаваля

Наведені вище формули швидкості витікання і масової витрати не враховують сил терті робочого тіла о стінки каналу і внутрішню тертю між струймінками потоку із-за різниці швидкостей по перетину каналу.

С врахування сил тертя газу дійсна швидкість потоку, при тому ж β , буде менше теоретичної швидкості. Відношення дійсної швидкості газу ω_d до теоретичної ω_2 називають коефіцієнтом швидкості

$$\varphi_{шв} = \frac{\omega_d}{\omega_2}.$$

Коефіцієнт $\varphi_{шв}$ по дослідним даним, для добре оброблених каналів змінюється від 0,96 до 0,98.

Якщо в розрахунках треба врахувати $\varphi_{шв}$, то дійсна швидкість, наприклад, для водяної пари, визначається по формулі

$$\varphi_d = \varphi_{шв} \cdot 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2}. \quad (8.14)$$

8.4. Дроселювання газу і пари

Термодинамічний процес, що відбувається при русі потоку через місцевий опір у каналі, супроводжуваний падінням тиску в напрямку течії, називається дроселюванням (рис. 8.7). Дроселювання протікає без підводу (відводу) теплоти зовні і без здійснення зовнішньої роботи. Цей процес необоротний і супроводжується зростанням ентропії. Всякий опір в трубопроводі (засувка, шайба, кран, клапан та інше) спричиняє дроселювання газу і, як слідство, падіння тиску.

Падіння тиску залежить від природи робочого тіла, його стану, сужіння газопроводу і швидкості руху газу.

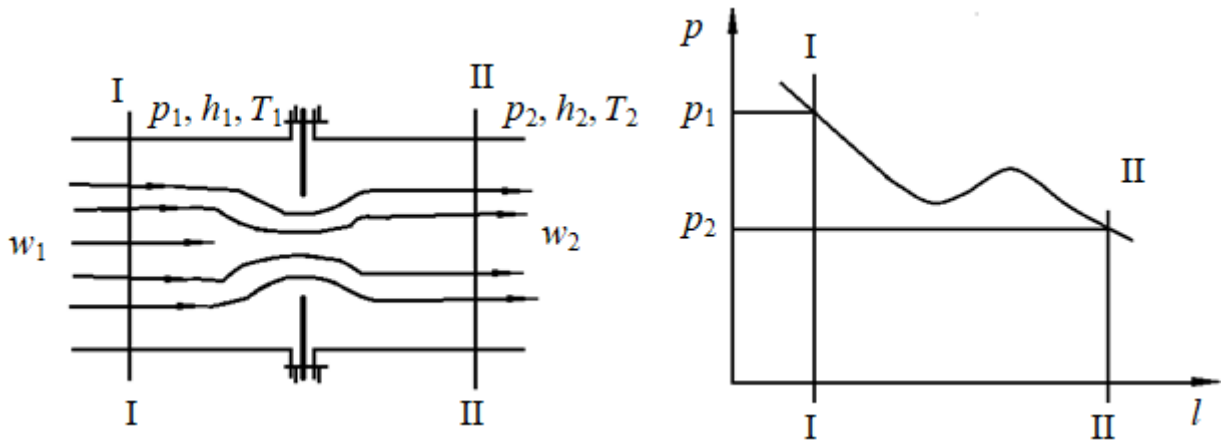


Рисунок 8.7 – Схема дроселювання потоку і графік зміни тиску вздовж каналу при дроселюванні

Оскільки масова витрата в кожному перерізі каналу не змінюється, а площа прохідного перерізу до звуження і після нього рівні, то швидкість течії змінюється незначно і приймається, що $w_1 = w_2$. тому з першого закону термодинаміки для адіабатного процесу дроселювання можна прийняти, що $h_1 = h_2$, тобто ентальпія в процесі дроселювання газу або пари не змінюється. При дроселюванні ідеального газу температура також не змінюється.

При дроселюванні реального газу температура його може зменшуватися, збільшуватися або залишатися незмінною. Коли температура реального газу в наслідок дроселювання залишається незмінною, то вона називається температурою інверсії $T_{\text{інв}}$. явище зміни стану робочого тіла в результаті процесу дроселювання виявлено дослідями Джоуля і Томсона.

Для кожного газу існує визначена температура інверсії, яка приблизно дорівнює

$$T_{\text{інв}} = 6,75 \cdot T_{\text{к}},$$

де $T_{\text{к}}$ – критична температура газу, К.

Дослідами також встановлено, що при початковій температурі потоку, яка менше температури інверсії, робоче тіло після дроселювання охолоджується. Якщо початкова температура більше температури інверсії, то робоче тіло після дроселювання нагрівається.

Оскільки процес дроселювання необоротний, його можна зображувати в $T-s$ і $h-s$ координатах лише умовно. Приклад умовного зображення процесу дроселювання для водяної пари наведено на $h-s$ діаграмі на рис. 8.8.

Із діаграми видно, що температура водяної пари в процесі дроселювання зменшується. При цьому волога насичена пара в залежності від величини початкового тиску, ступеня сухості і кінцевого тиску може бути після дроселювання вологою (А-Б), сухою насиченою (А-С) або перегрітою (А-Д).

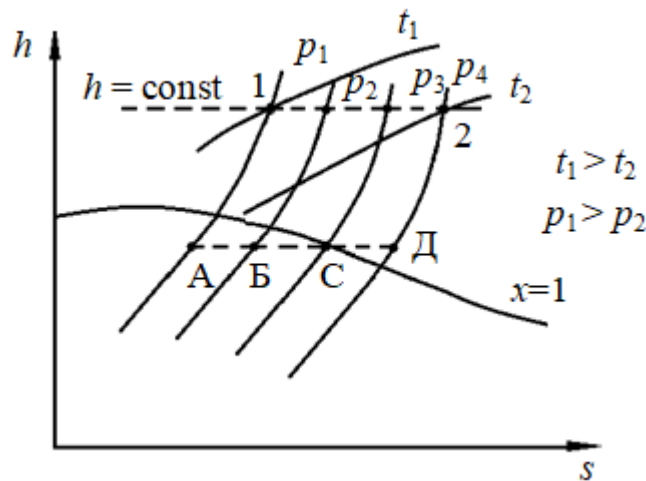


Рисунок 8.8 – Умовне зображення процесу дроселювання пари на h - s діаграмі

Не дивлячись на те, що дроселювання є необоротним процесом і супроводжується втратою работоздатності потоку, в силу простоти конструкції і експлуатації дросельних устрій, явище дроселювання використовується техніці для регулювання технологічних параметрів, вимірювання витрат і одержання низьких температур [7].

8.5. Методичні рекомендації до розв'язування задач

При вивченні даної теми студент повинен засвоїти поняття витікання і дроселювання газів і пари, уміти аналізувати ці процеси на основі першого закону термодинаміки. Необхідно знати, в яких галузях техніки використовуються процеси витікання і дроселювання газів і парів, уміти розрахувати швидкість витікання і масову секундну витрату при витіканні газу або пари із звужуваного, циліндричного або комбінованого сопла, уміти пояснити такі поняття як робота проштовхування потоку, режим витікання, криза витікання, критична швидкість витікання. Вихідні дані для самостійного розв'язування задач наведено в табл. 8.1.

8.6. Питання для самоперевірки

8.6.1. Як можна визначити процес витікання газу в аспекті перетворення енергії?

8.6.2. Який канал витікання газу називається соплом, а який дифузором?

8.6.3. Порівняйте рівняння першого закону термодинаміки для потоку і для термодинамічної системи, що рухається в просторі.

8.6.4. Сформулюйте і запишіть рівняння нерозривності для потоку.

8.6.5. Запишіть рівняння першого закону термодинаміки для випадку, коли газ витікає із сопла адіабатично.

8.6.6. Від чого залежить величина швидкості витікання і масової секундної витрати газу із сопла?

8.6.7. Побудуйте графік зміни швидкості витікання ідеального газу із звужуваного сопла залежно від перепаду тиску.

8.6.8. Побудуйте графік зміни масової секундної витрати газу залежно від перепаду тиску.

8.6.9. Що являє собою критичне відношення тисків? Поясніть це поняття.

8.6.10. З'ясуйте поняття кризи витікання.

8.6.11. Опишіть комбіноване сопло Лавалю, в яких випадках воно застосовується?

8.6.12. Поясніть процес витікання водяної пари і визначте його особливості.

8.6.13. Які існують режими витікання газів і парів?

8.6.14. Який процес називається дроселюванням і в яких технічних галузях він використовується?

8.6.15. Яким чином змінюються параметри потоку в процесі дроселювання ідеальних і реальних газів?

8.6.16. Чи змінюється працездатність потоку при дроселюванні?

8.6.17. Побудуйте графік процесу дроселювання водяної пари в координатах.

8.6.18. Що являє собою число Маха?

8.7. Приклади розв'язування задач

8.7.1. Вуглекислий газ (CO_2), який має на вході в сопло, що звужується, параметри $p_1 = 50$ бар і $t_1 = 37^\circ\text{C}$, витікає в середовище, тиск якого $p_2 = 30$ бар. визначити швидкість, витрату і температуру газу t_2 , якщо діаметр вихідного отвору $d = 20$ мм.

Розв'язання

Для визначення режиму витікання визначаємо $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{30}{50} = 0,6$ і порівнюємо з $\beta_k = 0,546$ (для трьохатомного газу). Отже $\beta > \beta_k$, тому режим витікання буде докритичний (дозвуковий).

В такому випадку швидкість витікання розраховуємо по формулі (8.4)

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

де $k = 1,29$ – показник адиабати для трьохатомних газів; $R = 189$ Дж/(кг·К) – газова стала для CO_2 .

$$\text{Отже } \omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,29}{1,29-1} 189 \cdot (37 + 273) \cdot \left[1 - (0,6)^{\frac{1,29-1}{1,29}} \right]} = 239,4 \text{ м/с.}$$

Масову секундну витрату визначаємо по формулі (8.5)

$$M = F_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = \left(\frac{3,14 \cdot 20^2}{4} \right) \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,29 \cdot (50 \cdot 10^5)^2}{1,29-1 \cdot 189 \cdot 310} \cdot \left[(0,6)_{1,29}^{\frac{2}{1,29}} - (0,6)_{1,29}^{\frac{1,29+1}{1,29}} \right]} = 4,28 \text{ кг/с.}$$

Температуру газу на виході з сопла визначимо з рівняння адиабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 310 \cdot 0,6^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 276 \text{ К або } t_2 = 3 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Температура газу CO₂ при витіканні з сопла зменшилася на 24 °С.

8.7.2. Визначити секундну масову витрату вуглецю СО і швидкість витікання з сопла, що звужується, якщо відомо, що на вході в сопло газ має параметри $p_1 = 15$ бар і $t_1 = 680$ °С. Тиск середовища, в яке газ витікає, дорівнює $p_2 = 3$ бар. Площа вихідного перерізу сопла $F_2 = 4$ см².

Розв'язання

Визначаємо перепад тиску $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{3}{15} = 0,20$ порівняємо з $\beta_k = 0,528$ (для

двоатомних газів). Отже $\beta < \beta_k$, тому режим витікання газу надкритичний. В такому випадку швидкість витікання буде дорівнювати місцевій швидкості звуку $\omega_{зв} = \omega_k$, витрата буде максимальною M_k , а адиабатний процес розширення газу буде не повний (рис. 8.4).

Швидкість витікання визначаємо за формулою (8.7)

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \cdot 297 \cdot (680 + 273)} = 574 \text{ м/с,}$$

де $k = 1,4$ – показник адиабати для двоатомних газів;

$$R = \frac{8314}{28} = 297 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} – \text{газова стала СО.}$$

Секундна масова витрата газу (8.8)

$$M_k = \sqrt{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \cdot k \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1}} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \cdot 1,4 \cdot \frac{(15 \cdot 10^5)^2}{297 \cdot 953}} = 0,772 \text{ кг/с.}$$

8.7.3. З сопла, що звужується витікає повітря в середовище з тиском $p_2 = 1$ бар. Тиск повітря перед соплом $p_1 = 28$ бар і температура $T_1 = 480$ °С. Відомо, що коефіцієнт швидкості $\varphi = 0,95$, а площа вихідного отвору $F_2 = 200$ мм². Визначити дійсну швидкість витікання і масову витрату газу.

Розв'язання

Тому що, перепад тиску $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{28} = 0,0357$ менше $\beta_k = 0,528$, режим

витікання буде надкритичний. теоретична швидкість витікання повітря на виході з сопла

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \cdot 286,7 \cdot (480 + 273)} = 502 \text{ м/с,}$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для повітря;

$$R = \frac{8314}{29} = 286,7 \text{ Дж/(кг·К)} – \text{газова стала повітря.}$$

Дійсна швидкість витікання

$$\omega_d = \omega_k \cdot \varphi = 502 \cdot 0,95 = 477 \text{ м/с.}$$

Теоретична витрата повітря

$$M_k = F_2 \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} k \frac{p_1^2}{R \cdot T_1}} = 200 \cdot 10^{-6} \sqrt{\left(\frac{2}{1,4+1}\right)^{\frac{1,4+1}{1,4-1}} 1,4 \cdot \frac{(28 \cdot 10^5)^2}{286,7 \cdot 773}} = 0,812 \text{ кг/с.}$$

Дійсна витрата повітря

$$M_d = M_k \cdot \varphi = 0,812 \cdot 0,95 = 0,771 \text{ кг/с.}$$

8.7.4. Повітря з початковими параметрами $p_1 = 0,4$ МПа і $t_1 = 20$ °С витікає крізь сопло, що звужується, в атмосферу тиск якої $p_2 = 0,1$ МПа. Визначити теоретичну швидкість і параметри повітря на виході з сопла, а також площу вихідного перерізу, якщо витрата повітря $M = 1,5$ кг/с.

Розв'язання

Визначаємо перепад тиску $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,1}{0,4} = 0,25$ і порівнюємо з

$\beta_k = 0,528$ для повітря, як для двохатомного газу. Отже $\beta < \beta_k$, тому режим витікання надкритичний. графічне зображення адіабатного процесу розширення газу при такому режимі витікання показано на рис. 8.4. У відповідності до режиму витікання швидкість витікання знаходимо з формули (8.7)

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1}.$$

Площу вихідного перерізу сопла знаходимо з рівняння нерозривності струменя

$$F_2 = \frac{M \cdot v_k}{\omega_k},$$

де $k = 1,4$ – показник адіабати для повітря; $R = 297$ Дж/(кг·К) – газова стала повітря; v_k – поточний об’єм повітря на виході з сопла, який визначається з

рівняння адіабати $v_k = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_k}\right)^{\frac{1}{k}}$; $p_k = \beta_k \cdot p_1 = 0,528 \cdot 0,4 = 0,21$ МПа критичний

тиск; v_1 – початковий питомий об’єм повітря, який визначається з рівняння

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{297 \cdot (20 + 273)}{0,4 \cdot 10^6} = 0,217 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\text{Отже } v_k = 0,217 \cdot \left(\frac{0,4}{0,21}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,343 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\omega_k = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4 + 1} \cdot 297 \cdot 293} = 318,6 \text{ м/с}.$$

$$F_2 = \frac{1,5 \cdot 0,343}{318,6} = 0,61 \cdot 10^{-4} = 1614 \text{ мм}^2.$$

Температуру на виході з сопла визначаємо з рівняння адіабати

$$\frac{T_k}{T_1} = \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta_k^{\frac{k-1}{k}}, \text{ звідки } T_k = T_1 \cdot \beta_k^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 0,528^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 244 \text{ К}.$$

Таким чином, площа перерізу сопла на виході $F_2 = 1614$ мм²; параметри стану повітря: $p_k = 0,21$ МПа, $T_k = 244$ К, $v_k = 0,343$ м³/кг. При надкритичному режимі витікання перепад тиску від $p_k = 0,21$ МПа до $p_2 = 0,1$ МПа не використовується.

8.7.5. В резервуарі, який заповнений газом N_2 , підтримується надлишковий тиск $p_H = 0,9$ МПа і температура $T_1 = 177$ °С. Газ витікає через сопло у середовище з абсолютним тиском $0,2$ МПа. Вибрати раціональну форму сопла і визначити швидкість витікання, витрату M , а також кінцеву температуру газу. Площа вихідного перерізу сопла дорівнює $F_2 = 380$ мм². Атмосферний тиск дорівнює $B = 760$ мм рт.ст.

Розв’язання

Абсолютний тиск в резервуарі

$$p_1 = p_H + B = 9 \cdot 10^5 + 760 \cdot 133 = 10,01 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,001 \text{ МПа}.$$

Визначаємо перепад тиску $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,2}{1,001} = 0,2$. Перепад тиску β менше

$\beta_k = 0,528$, тому режим витікання надкритичний. Для використання повного перепаду тиску вибираємо комбіноване сопло (сопло Лавалє).

Швидкість витікання визначаємо за формулою (8.4)

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} 297 \cdot (177 + 273) \cdot \left[1 - 0,2^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 518 \text{ м/с},$$

де $k=1,4$ – показник адиабати для азоту N_2 ; $R=297$ Дж/(кг·К) – газова стала N_2 .

Масову витрату газу визначаємо за формулою (8.5)

$$M = F_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} =$$

$$= 380 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \cdot \frac{(10,01 \cdot 10^5)^2}{297 \cdot 350} \left[0,2^{\frac{2}{1,4}} - 0,2^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]} = 0,598 \text{ кг/с}.$$

Температуру азоту на виході з сопла визначаємо з рівняння адиабати

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 350 \cdot 0,2^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 221 \text{ К}.$$

8.7.6. Аргон з початковими параметрами $p_1 = 3$ МПа і $t_1 = 250$ °С витікає в атмосферу ($p_2 = 0,1$ МПа) крізь сопло Лавалю в кількості $M = 0,8$ кг/с. Визначити площі мінімального F_{\min} та вихідного F_2 перерізів сопла, якщо його швидкісний коефіцієнт $\varphi = 0,9$.

Розв'язання

Площі F_{\min} і F_2 знаходимо з рівняння нерозривності струменя

$$F_{\min} = \frac{M \cdot v_k}{\omega_{к,д}},$$

$$F_2 = \frac{M \cdot v_2}{\omega_{2,д}},$$

де v_k – питомий об'єм газу у мінімальному перерізі сопла; v_2 – питомий об'єм газу у вихідному перерізі сопла; $\omega_{к,д}$ – дійсна швидкість витікання газу у мінімальному перерізі сопла; $\omega_{2,д}$ – дійсна швидкість витікання газу у вихідному перерізі сопла.

Для визначення питомих об'ємів газу використовуємо рівняння адиабати

$$\left(\frac{v_1}{v_k} \right)^k = \frac{p_k}{p_1} = \beta_k \quad \text{звідки} \quad v_k = \frac{v_1}{\beta_k^{\frac{1}{k}}},$$

де $v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p} = \frac{208 \cdot (250 + 273)}{3 \cdot 10^6} = 0,036$ м³/кг; $R = 208$ Дж/(кг·К) – газова стала аргону; $\beta_k = 0,487$ – критичний перепад тиску для одноатомних газів; $k = 1,67$ – показник адиабати для одноатомних газів.

$$\text{Отже } v_k = \frac{0,036}{\frac{1}{0,487^{1,67}}} = 0,0553 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\beta^k} = \frac{0,036}{\left(\frac{0,1}{3}\right)^{1,67}} = 0,13 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\omega_{к,д} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1} = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67}{1,67+1} \cdot 208 \cdot 523} = 332 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2д} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67}{1,67-1} \cdot 208 \cdot 523 \cdot \left(1 - 0,33^{\frac{1,67-1}{1,67}}\right)} = 398 \text{ м/с}.$$

Розраховуємо площі перерізів сопла F_{\min} та F_2

$$F_{\min} = \frac{0,8 \cdot 0,0553}{332} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 133 \text{ мм}^2,$$

$$F_2 = \frac{0,8 \cdot 0,13}{398} = 2,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 261 \text{ мм}^2.$$

8.7.7. Визначити теоретичну швидкість і витрату при течії пари із резервуара крізь сопло, що звужується. Параметри пари в резервуарі: тиск $p_1 = 10$ бар температура 300°C , а площа перерізу на виході з сопла $F_2 = 180 \text{ мм}^2$.

Пара витікає в середовище з тиском 6 бар. Процес розширення пари в соплі завжди приймається адіабатним (рис. 8.9).

Розв'язання

Визначаємо режим витікання пари. Для цього розраховуємо $\beta = \frac{p_2}{p_1}$ і

порівнюємо з $\beta_k = 0,546$. $\beta = \frac{6}{10} = 0,6$ тобто більше β_k . Отже режим витікання докритичний. Для такого режиму витікання швидкість пари визначається з рівняння (8.3)

$$\omega_2 = 44,76 \cdot \sqrt{h_1 - h_2}.$$

Значення ентальпії пари знаходимо з h - s діаграми: $h_1 = 3050$ кДж/кг,

$$h_2 = 2930 \text{ кДж/кг}, \text{ отже } \omega_2 = 44,76 \cdot \sqrt{3050 - 2930} = 490,3 \text{ м/с}.$$

Витрату знаходимо з виразу (8.10)

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_2}{v_2}.$$

Питомий об'єм пари на виході з сопла визначаємо з h - s діаграми (рис. 8.9) $v_2 = 0,395 \text{ м}^3/\text{кг}$.

$$\text{Отже } M = \frac{180 \cdot 10^{-6} \cdot 490,3}{0,395} = 0,223 \text{ кг/с}.$$

8.7.8. Визначити теоретичну швидкість, масову витрату і кінцеву температуру пари, якщо витікання з котла відбувається крізь циліндричне сопло в атмосферу. тиск пари в котлі 1,5 МПа, температура $t_1 = 350$ °С. Барометричний тиск приймаємо $p_2 = 750$ мм рт.ст., площу перерізу циліндричного сопла 200 мм².

Розв'язання

Визначаємо значення перепаду тиску β і порівнюємо з $\beta_k = 0,546$.

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{750 \cdot 133}{1,5 \cdot 10^6} = 0,066.$$

Через те, що $\beta < \beta_k$ – режим витікання надкритичний, тому для даної конструкції сопла швидкість витікання розраховуємо по формулі (8.11)

$$\omega_2 = \omega_k = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_k},$$

де $h_1 = 3150$ кДж/кг визначаємо з h - s діаграми.

Для визначення h_k знаходимо критичний тиск з виразу $p_k = p_1 \cdot \beta_k = 0,546 \cdot 1,5 = 0,819$ МПа = 819 кПа. Враховуючи, що витікання пари є адіабатний процес розширення, положення критичної точки К на h - s діаграмі визначається точкою перетину адіабати та ізобари p_k (рис. 8.5). В цій точці $h_k = 2980$ кДж/кг, $v_k = 0,3$ м³/кг.

Отже $\omega_k = 44,7 \cdot \sqrt{3150 - 2980} = 583$ м/с.

Масова витрата пари (8.12)

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_k}{v_k} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 583}{0,3} = 0,389 \text{ кг/с.}$$

Кінцеву температуру пари на виході з сопла визначаємо на h - s діаграмі по ізотермі, яка проходить через точку К і дорівнює $t_k = 263$ °С (рис. 8.5).

8.7.9. Початкові параметри пари, яка надходить до сопла такі: $p_1 = 45$ бар, $t_1 = 400$ °С. Тиск середовища куди витікає пара дорівнює $p_2 = 24$ бар. Витрата пари складає 0,8 кг/с. Вибрати тип сопла і розрахувати площу його вихідного перерізу. Зобразити процес в h - s координатах.

Розв'язання

Відповідно методики розрахунку витікання пари з сопла визначаємо β і порівнюємо з β_k .

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{24}{45} = 0,555. \text{ тому що } \beta > \beta_k = 0,546 \text{ режим витікання буде до}$$

критичний. В такому випадку доцільно вибрати сопло, що звужується або циліндричне.

Площу вихідного перерізу сопла визначаємо з рівняння (8.10)

$$F = \frac{M \cdot v_2}{\omega_2},$$

де ω_2 – швидкість пари на виході з сопла, яку визначаємо з рівняння

$$\omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} = 44,7 \cdot \sqrt{3200 - 3020} = 599,7 \text{ м/с.}$$

Значення h_1 , h_2 і v_2 знаходимо по h - s діаграмі (рис.8.9). $h_1 = 3200$ кДж/кг, $h_2 = 3020$ кДж/кг, $v_2 = 0,11$ м³/кг.

$$\text{Отже } F = \frac{0,8 \cdot 0,11}{599,7} = 1,47 \cdot 10^{-4} = 147 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Отже } F = \frac{0,8 \cdot 0,11}{599,7} = 1,47 \cdot 10^{-4} = 147 \text{ мм}^2.$$

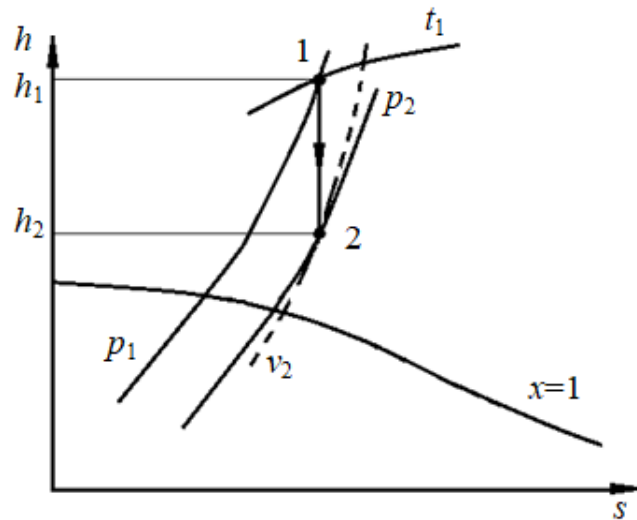


Рисунок 8.9 – До прикладів 8.7.7, 8.7.9

8.7.10. Визначити теоретичну швидкість, секундну витрату, температуру наприкінці адіабатного розширення при витіканні пари з сопла Лаваля для таких умов: $p_1 = 15$ бар, $t_1 = 300$ °С, $p_2 = 1$ бар. Площа вихідного перерізу $F_2 = 300$ мм². Зобразити процес витікання в h - s координатах і визначити стан пари наприкінці адіабатного розширення.

Розв'язання

Швидкість витікання визначаємо за формулою (8.3)

$$\omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} .$$

Секундну витрату пари визначаємо за формулою (8.10)

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_2}{v_2} .$$

Значення ентальпій h_1 , h_2 , густину пари v_2 і температуру t_2 визначаємо за допомогою h - s діаграми (рис. 8.10): $h_1 = 3040$ кДж/кг, $h_2 = 2520$ кДж/кг, $v_2 = 1,58$ м³/кг, $t_2 = 100$ °С.

$$\text{Отже } \omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{3040 - 2520} = 1019 \text{ м/с.}$$

$$M = \frac{300 \cdot 10^{-6} \cdot 1019}{1,58} = 0,193 \text{ кг/с.}$$

Наприкінці адіабатного розширення в точці 2 пара буде вологою насиченою зі ступенем сухості $x_2 = 0,93$ і температурою $100\text{ }^\circ\text{C}$.

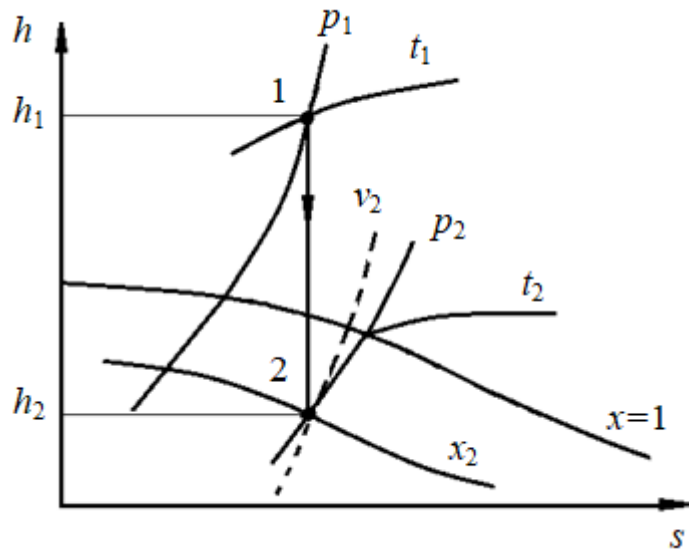


Рисунок 8.10 – До прикладу 8.7.10

8.7.11. Перегріта водяна пара з початковими параметрами $p_1 = 20\text{ МПа}$, $t_1 = 450\text{ }^\circ\text{C}$ витікає з сопла Лаваля в середовище з тиском $p_2 = 0,02\text{ МПа}$. Визначити швидкість і секундну витрату пари в мінімальному і вихідному перерізі сопла. площу мінімального перерізу сопла приймаємо $F_{\min} = 400\text{ мм}^2$.

Розв'язання

Швидкість витікання пари на виході з сопла розраховуємо по формулі (8.3)

$$\omega_2 = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_2} = 44,7 \cdot \sqrt{3365 - 2770} = 1090\text{ м/с},$$

де значення ентальпій h_1 і h_2 знайдені за допомогою h - s діаграми.

Для визначення швидкості і витрати пари в мінімальному перерізі сопла необхідно знати критичний тиск p_k , який розраховуємо по формулі $p_k = p_1 \cdot \beta = 20 \cdot 0,546 = 10,9\text{ МПа}$.

Значення швидкості в мінімальному перерізі сопла (ω_k) визначаємо з виразу $\omega_k = 44,7 \cdot \sqrt{h_1 - h_k} = 44,7 \cdot \sqrt{3365 - 3050} = 793\text{ м/с}$,

де h_k – значення ентальпії в точці К (рис.8.11), яка лежить на перетині адіабати 1-2 і ізобари з тиском p_k .

Масова витрата пари в мінімальному перерізі і на виході з сопла однакова і визначається за формулою (8.14)

$$M = \frac{F_{\min} \cdot \omega_k}{v_k} = \frac{400 \cdot 10^{-6} \cdot 793}{0,25} = 1,27\text{ кг/с}.$$

Значення $v_k = 0,25 \text{ м}^3/\text{кг}$ і $t_k = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ знаходяться по h - s діаграмі.

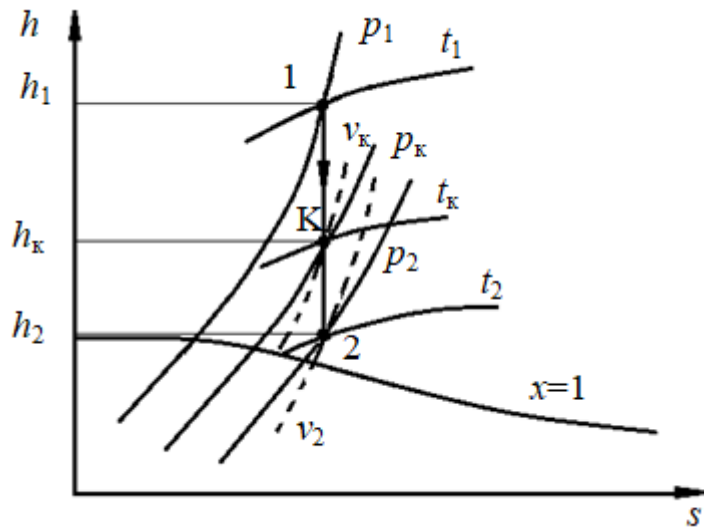


Рисунок 8.11 – До прикладу 8.7.11

8.7.12. Волога пара з параметрами стану $p_1 = 1 \text{ МПа}$ і $x_1 = 0,8$ дроселюється у редукційному клапані до тиску $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$. Визначити стан і параметри пари після дроселювання, а також зміну внутрішньої енергії Δu і ентропії Δs в цьому термодинамічному процесі.

Розв'язання

Процес дроселювання вологої пари можна наочно показати на h - s діаграмі.

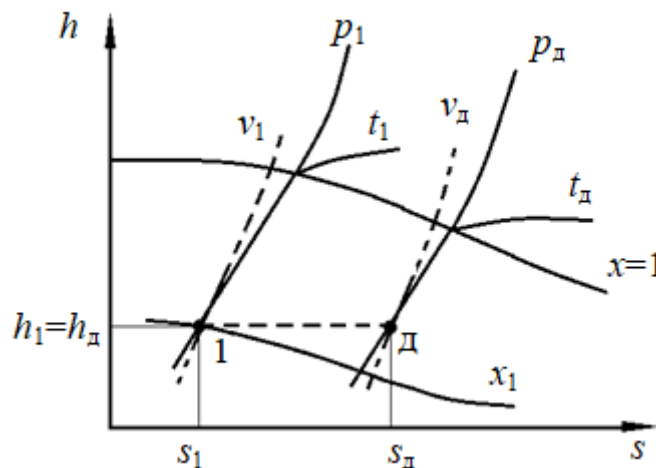


Рисунок 8.12 – До прикладу 8.7.12

Визначаємо параметри стану пари за допомогою h - s діаграми на початку і в кінці процесу дроселювання

т. 1 $p_1 = 1 \text{ МПа} = 1000 \text{ кПа}$, $x_1 = 0,8$, $t_1 = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_1 = 0,16 \text{ м}^3/\text{кг}$,
 $s_1 = 5,7 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $h_1 = 2380 \text{ кДж}/\text{кг}$, $u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 2380 - 1000 \cdot 0,16 = 2220$
 кДж/кг.

т. д $p_d = 0,12 \text{ МПа} = 120 \text{ кПа}$, $x_d = 0,865$, $t_d = 105 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_d = 1,2 \text{ м}^3/\text{кг}$,
 $s_d = 6,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $h_d = h_1$, $u_d = h_d - p_d \cdot v_d = 2380 - 120 \cdot 1,2 = 2236 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Після дроселювання пара залишилася вологою насиченою зі ступенем сухості $x_d = 0,865$.

Зміна ентропії $s_1 - s_d = 6,5 - 5,7 = 0,8 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Зміна внутрішньої енергії $\Delta u = u_d - u_1 = 2236 - 2220 = 16 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Зміна температури $\Delta t = 180 - 105 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Зміна тиску $\Delta p = 1000 - 120 = 880 \text{ кПа}$.

8.7.13. Перегріта пара з параметрами $p_1 = 3 \text{ МПа}$ і $t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ дроселюється в регулюючому клапані парової турбіни до $p_2 = 1,5 \text{ МПа}$. Визначити стан і параметри пари після дроселювання, а також зміну внутрішньої енергії і ентропії.

Розв'язання

За допомогою h - s діаграми визначаємо параметри на початку і в кінці процесу дроселювання (рис. 8.13)

т.1 $p_1 = 3 \text{ МПа} = 3000 \text{ кПа}$, $t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$, $s_1 = 6,93 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$,
 $h_1 = 3230 \text{ кДж}/\text{кг}$, $u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 3230 - 300 \cdot 0,1 = 2930 \text{ кДж}/\text{кг}$.

т.2 $p_2 = 1,5 \text{ МПа} = 1500 \text{ кПа}$, $t_2 = 390 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_2 = 0,22 \text{ м}^3/\text{кг}$, $s_2 = 7,25 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$,
 $h_2 = 3230 \text{ кДж}/\text{кг}$, $u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 3230 - 1500 \cdot 0,22 = 2900 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Стан пари після дроселювання залишається перегрітим.

Зміна внутрішньої енергії

$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = 2900 - 2930 = -30 \text{ кДж}/\text{кг}$.

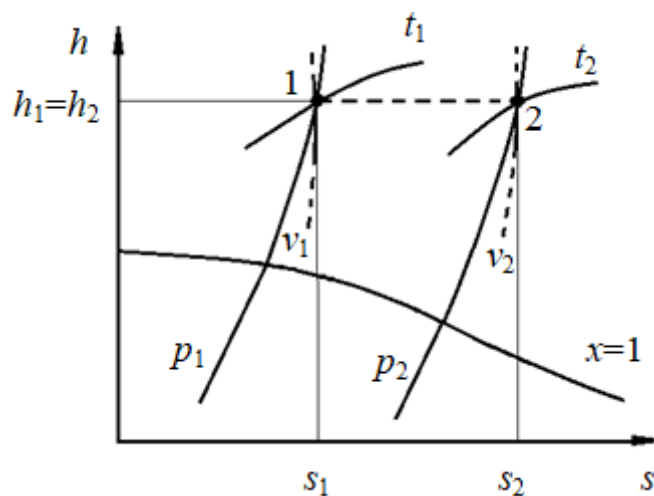


Рисунок 8.13 – До прикладу 8.7.13

Зміна ентропії $\Delta s = s_2 - s_1 = 7,25 - 6,93 = 0,32 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

В результаті дроселювання перегрітої пари тиск і температура зменшилися, ентропія і питомий об'єм зросли, внутрішня енергія зменшилась.

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 7,25 - 6,93 = 0,32 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

8.7.14. Водяна пара під тиском $p_1 = 30$ бар, температура $t_1 = 450^\circ\text{C}$ дроселюється до тиску $p_d = 10$ бар, після чого надходить до сопел парової турбіни, де адіабатно розширюється до кінцевого тиску $p_2 = 0,7$ бар. Визначити доцільну форму каналу сопла, швидкість витікання, витрату і кінцеву температуру пари. Площа вихідного перерізу сопла $F_2 = 420 \text{ мм}^2$.

Розв'язання

Перепад тиску $\beta = \frac{p_2}{p_d} = \frac{0,7}{10} = 0,07$, тобто значно менше $\beta_k = 0,546$, в

такому випадку доцільно використовувати сопло Лаваля.

Для розрахунку швидкості витікання, витрати і знаходження кінцевої температури пари t_2 визначаємо необхідні параметри пари в характерних точках процесу дроселювання і адіабатного розширення в соплах парової турбіни (рис. 8.14)

т.1 $p_1 = 30$ бар = 3000 кПа, $t_1 = 450^\circ\text{C}$, $h_1 = 3350$ кДж/кг.

т.д $p_d = 10$ бар = 1000 кПа, $t_d = 440^\circ\text{C}$, $h_1 = h_d = 3350$ кДж/кг.

т.2 $p_2 = 0,7$ бар = 70 кПа, $t_2 = 110^\circ\text{C}$, $h_2 = 2675$ кДж/кг, $v_2 = 2,5 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Швидкість витікання пари

$$\omega_d = 44,7 \cdot \sqrt{h_d - h_2} = 44,7 \cdot \sqrt{3350 - 2675} = 1161 \text{ м/с}.$$

Витрата пари

$$M = \frac{F_2 \cdot \omega_2}{v_2} = \frac{420 \cdot 10^{-6} \cdot 1161}{2,5} = 0,195 \text{ кг/с}.$$

Температура пари на виході з сопла дорівнює 110°C .

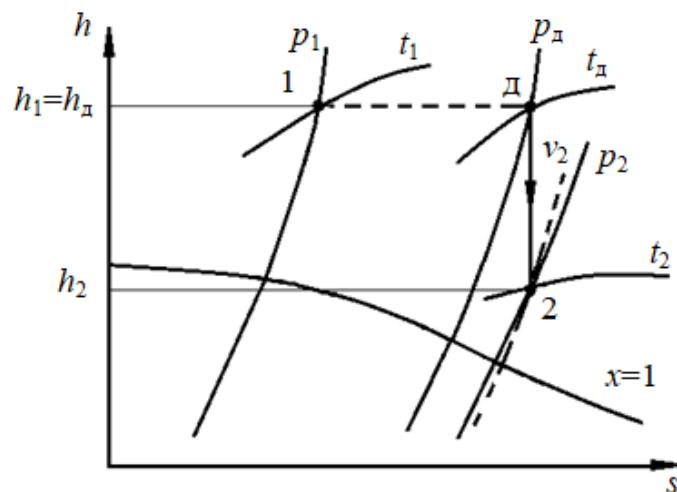


Рисунок 8.14 – До прикладу 8.7.14

8.8. Задачі

8.8.1. Визначити теоретичну швидкість адіабатичного витікання газу (табл. 8.1) і його секундну витрату, якщо тиск перед соплом дорівнює p_1 , а температура t_1 , а на виході із сопла тиск відповідає величині p_2 , площа вихідного перетину сопла становить F .

8.8.2. Газ, тиск якого дорівнює p_1 , а температура t_1 (табл. 8.1), витікає з резервуара. Обчислити значення тиску p_2 , при якому теоретична швидкість адіабатичного витікання буде дорівнювати критичній, і визначити, яка при цьому буде масова витрата газу, знаючи, що площа вихідного перетину сопла відповідає величині F .

8.8.3. Визначити теоретичну швидкість адіабатичного витікання газу через сопло Лавалля, витрату й кінцеву температуру газу (табл. 8.1), якщо тиск у резервуарі дорівнює p_1 , а температура t_1 , тиск середовища на виході із сопла становить $0,1 p_1$, площа мінімального перетину сопла F_{\min} . Порівняти отриману швидкість з критичною.

8.8.4. У резервуарі, заповненому газом, підтримується надлишковий тиск p_1 і температура t_1 (табл. 8.1). Газ витікає через звужуване сопло в середовище, абсолютний тиск якого дорівнює p_2 . Визначити швидкість витікання, витрату і кінцеву температуру газу. Вважати, що площа вихідного перетину сопла при адіабатичному витіканні дорівнює F .

8.8.5. Газ, величина тиску якого дорівнює p_1 , а температура t_1 (табл. 8.1), витікає в атмосферу через захисний клапан (циліндричне сопло) перетином F . Визначити швидкість витікання, витрату і кінцеву температуру газу. Процес розширення вважати адіабатичним.

8.8.6. Визначити теоретичну швидкість витікання пари із котла в атмосферу та її витрату. Тиск пари у котлі дорівнює p_1 , температура t_1 , площа вихідного перетину сопла становить F . Процес розширення пари вважати адіабатичним.

Таблиця 8.1

Остання цифра шифру	Газ	p_1 , МПа	p_2 , МПа	p_d , МПа	t_1 , °С	Перед-остання цифра шифру	F , мм ²	F_{\min} , мм ²	x	m , кг/с	φ	ω , м/с
0	Повіт.	3,6	1,9	2,8	280	0	50	35	0,88	0,25	0,97	540
1	O ₂	2,4	0,5	1,5	250	1	65	45	0,79	0,14	0,95	420
2	H ₂	3,5	0,3	2,3	320	2	79	51	0,82	0,36	0,98	560
3	CO ₂	3,1	0,06	1,5	350	3	68	38	0,91	0,52	0,94	500
4	N ₂	2,6	0,07	1,3	290	4	95	70	0,95	0,71	0,93	480
5	SO ₂	1,2	0,03	0,7	230	5	85	63	0,83	0,29	0,90	330
6	CH ₄	1,7	0,04	1,0	240	6	88	52	0,87	0,41	0,96	380
7	CO	2,5	1,5	2,0	400	7	74	43	0,93	0,16	0,89	390
8	N ₂ O	3,7	0,9	2,6	450	8	81	62	0,96	0,31	0,92	490
9	Повіт.	2,2	0,08	1,7	380	9	95	55	0,94	0,28	0,91	400

8.8.7. Волога пара, тиск якої дорівнює p_1 , а ступінь сухості x_1 , витікає в середовище з тиском p_2 , площа вихідного перетину сопла становить F . Визначити теоретичну швидкість при адіабатичному витіканні пари, її секундну витрату й температуру на виході із сопла.

8.8.8. Водяна пара, тиск якої дорівнює p_1 , а температура t_1 , при витіканні із сопла розширюється адіабатично до тиску $0,05 p_1$. Визначити площу мінімального і вихідного перетину сопла, а також яка при цьому швидкість витікання пари, якщо її витрата становить M .

8.8.9. Визначити площі мінімального і вихідного перетину сопла Лавалля, якщо відомі такі параметри пари, що перебуває перед соплом: тиск дорівнює p_1 , а температура t_1 . Тиск пари, яка перебуває за соплом, становить $0,08 p_1$. Витрата пари, яка проходить через сопло, дорівнює M , швидкісний коефіцієнт φ .

8.8.10. У парову турбину подається пара з такими параметрами: тиск дорівнює p_1 , температура t_1 . У клапанах турбіни пара дроселюється до величини p_d і надходить у розширюване сопло, після розширення тиск пари становить $0,06 p_d$. Витрата пари, яка проходить через сопло, дорівнює M , швидкісний коефіцієнт φ . Визначити площі мінімального і вихідного перетинів сопла.

8.8.11. Відпрацьована пара масою M із парової турбіни надходить у конденсатор. Стан відпрацьованої пари: тиск дорівнює p_2 , ступінь сухості x . Визначити діаметр вхідного патрубку конденсатора, якщо швидкість пари в ньому становить ω .

8.8.12. Пара, тиск якої дорівнює p_1 , а температура t_1 , дроселюється до величини тиску p_d , після чого вона надходить у сопла парової турбіни, де адіабатично розширюється до величини тиску p_2 . Визначити доцільну форму каналу сопла витікання, обчислити витрату і кінцеву температуру пари. Площа мінімального перетину сопла становить F_{\min} .

9. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ

Викладено короткі теоретичні відомості про основні положення; основні параметри та стан вологого повітря; психрометр; визначення параметрів та аналіз термодинамічних процесів у вологому повітрі за I-d-діаграмою.

Мета – сформуванню знання про основні параметри та стан вологого повітря; психрометр; визначення параметрів та аналіз термодинамічних процесів у вологому повітрі за I-d-діаграмою.

Студент з опорою на матеріал повинен вміти:

- знати закономірності, яким підпорядковується стан вологого повітря при зміні зовнішніх умов;
- вміти визначати параметри вологого повітря аналітично та за допомогою спеціальних діаграм;
- за допомогою психрометра вимірювати вологість вологого повітря.

9.1. Основні параметри стану вологого повітря

До складу атмосферного повітря в реальних умовах завжди входить деяка кількість вологи. Наявність її в повітрі впливає на перебіг термодинамічних процесів і інколи цей вплив може бути настільки суттєвим, що його неврахування призводить до серйозних похибок.

Велике значення для більшості технічних систем має вологе повітря при атмосферному або близькому до нього тиску в температурному інтервалі, обмеженому невеликими додатними та невеликими від'ємними температурами. При цих параметрах усі компоненти повітря – практично ідеальні гази, за виключенням води, яка близька до стану насичення, і залежно від температури суміші вона може знаходитись у паровій, рідинній або твердій фазах. Ця обставина відрізняє вологе повітря від звичайних газових сумішей і робить необхідним додаткове його вивчення.

Якщо у вологому повітрі немає крапельної вологи, то його розглядають як ідеально-газову суміш сухого повітря та водяної пари. Сухе повітря за своїми властивостями дійсно дуже близьке до ідеального газу. Але виникає питання стосовно припустимості вважати водяну пару в стані, близькому до насичення, ідеальним газом. Не можна використовувати ідеально-газові залежності при розрахунках парових термодинамічних процесів. Це, на перший погляд, протиріччя пояснюється дуже низьким парціальним тиском водяної пари в складі вологого повітря – при температурах атмосферного повітря від 0 до 50 °С воно становить 0,61 – 12 кПа у той самий час як нормальний атмосферний тиск близький до 100 кПа. Наслідком цього є те, що вміст водяної пари у вологому повітрі не перевищує, зазвичай, 3 – 4 % і тому з достатньою для технічних розрахунків точністю можна вважати вологе повітря ідеальним

газом, який підпорядковується всім законам суміші ідеальних газів, хоча в ряді випадків необхідно враховувати реальні властивості водяної пари.

Термодинамічні властивості сухого повітря та водяної пари різні, тому властивості вологого повітря залежать від його кількісного складу [10].

Відповідно до закону Дальтона абсолютний тиск вологого повітря дорівнює сумі парціальних тисків сухого повітря та водяної пари, тобто

$$p = p_{\text{СП}} + p_{\text{ВП}} \quad (9.1)$$

Чим більше водяної пари знаходиться в пароповітряній суміші, тим вищий парціальний тиск пари. У той самий час парціальний тиск водяної пари у вологому повітрі не може перевищувати тиск насичення пари нас при даній температурі повітря, тобто максимально можливе значення парціального тиску водяної пари у вологому повітрі при певній температурі

$$p_{\text{нас}} = p_{\text{ВП max}} \quad (9.2)$$

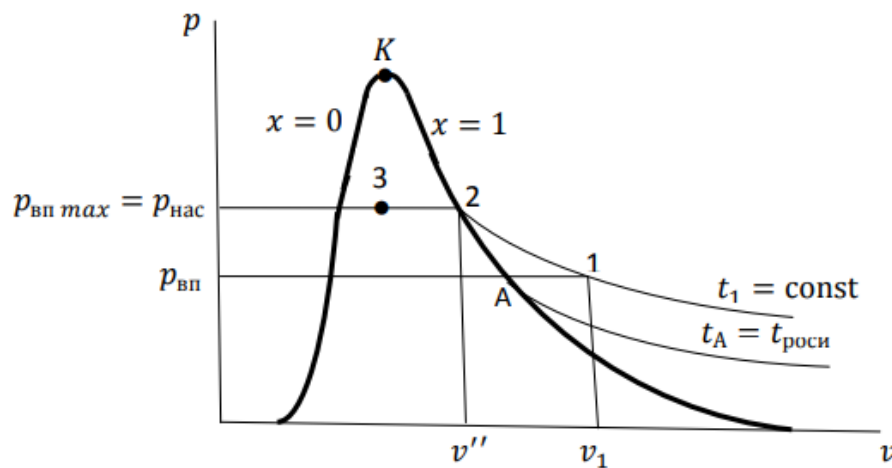


Рисунок 9.1 – Діаграма стану водяної пари у вологому повітрі

Величина максимального парціального тиску водяної пари у вологому повітрі визначається лише температурою суміші та не залежить від її тиску. Для наочності на рис. 9.1 зображена діаграма стану водяної пари у вологому повітрі. Стан пари визначається температурою повітря та парціальним тиском пари. Водяна пара у вологому повітрі може бути перегрітою або насиченою. У першому випадку повітря ненасичене вологою і називається ненасиченим вологим повітрям. Перегрітому стану вологої пари в повітрі відповідає точка 1 на рис. 9.1. Якщо $p_{\text{ВП}} = p_{\text{нас}}$, то в повітрі буде знаходитися насичена водяна пара. У цьому разі повітря може бути насиченим вологою, якщо водяна пара в ньому суха насичена (точка 2 на рис. 9.1) [10].

Таке повітря називається насиченим вологим повітрям. Якщо в повітрі знаходиться волога насичена пара (точка 3 на рис. 9.1), то воно перенасичене вологою та називається перенасиченим вологим повітрям – у такому повітрі крім сухої насиченої пари присутні зважені дрібнодисперсні крапельки води (водяний туман) або кристалики льоду (снігу) [10].

Якщо ненасичене вологе повітря охолоджувати при сталому тиску, то спочатку кількість водяної пари в ньому залишатиметься незмінною, тобто процес буде проходити при постійному парціальному тиску водяної пари. Такий процес може продовжуватися доти, доки температура повітря та пари не зменшиться до температури насичення пари при даному парціальному тиску – у цей момент пара, що знаходиться в повітрі, досягне стану насичення. Це проілюстровано на рис. 9.1, де перегріта пара з початковою температурою t_1 в результаті ізобарного охолодження до температури t_A (точка А) переходить із перегрітого стану в насичений. При подальшому зниженні температури з повітря почне випадати волога та зменшуватися парціальний тиск пари. З цим явищем часто можна зустрітися в повсякденному житті, коли при охолодженні атмосферне повітря стає перенасиченим вологою, про що свідчить поява в ньому роси або туману.

Температура, при якій досягається насичення повітря вологою при певному парціальному тиску пари, називається температурою точки роси. Вона позначається $t_{\text{роси}}$. Це найменша температура, до якої можна охолоджувати вологе повітря без випадіння з нього конденсату.

Кількісний склад вологого повітря характеризують абсолютною вологістю ρ – це маса пари, що знаходиться в одному кубічному метрі вологого повітря, тобто це густина водяної пари, яка знаходиться в повітрі. Одиниця виміру абсолютної вологості – кг водяної пари/м³. Через те, що найбільшу густину при заданій температурі має суха насичена пара, то абсолютна вологість повітря буде максимальною у разі, коли парціальний тиск водяної пари буде дорівнювати тиску насичення. Необхідно звернути увагу на те, що абсолютна вологість вказує на вміст у повітрі лише однієї – парової фази води [10].

Відношення фактичної абсолютної вологості до максимально можливої при даній температурі називається відносною вологістю повітря:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{ВП}}}{\rho_{\text{сВП}}}, \quad (9.3)$$

де $\rho_{\text{ВП}}$ – густина водяної пари, що знаходиться у вологому повітрі, кг/м³; $\rho_{\text{сВП}}$ – густина сухої насиченої пари при температурі вологого повітря, кг/м³. Для ідеальних газів, що мають однакові температури, відношення густин може бути замінене відношенням відповідних тисків, тобто

$$\varphi = \frac{P_{\text{ВП}}}{P_{\text{сВП}}} \quad (9.4)$$

Для ненасиченого вологого повітря $\varphi < 1$. Для насиченого – $\varphi = 1$. Найчастіше φ вказують у відсотках. Відносна вологість повітря характеризує його потенціальну спроможність випаровувати вологу та вбирати в себе пару з оточуючого середовища при даній температурі.

Важливим параметром, що характеризує вологе повітря, є його вологовміст, який являє собою відношення маси водяної пари $m_{\text{ВП}}$ у вологому

повітрі до маси сухого повітря $m_{\text{СП}}$ в ньому. Позначають вологовміст d , вимірюють у кг пари/кг сухого повітря:

$$d = \frac{m_{\text{ВП}}}{m_{\text{СП}}} \quad (9.5)$$

Отже величина d вказує, яка маса пари знаходиться в 1 кг сухого повітря або в $(1+d)$ кг вологого повітря. Слід зазначити, що поняття «вологовміст» взагалі відноситься не лише до парової, а й до рідинної та твердої фаз води. Якщо ж мова йде тільки про пару, то цю величину часто називають паровмістом [10].

Питомі калорійні параметри вологого повітря відносять зазвичай до 1 кг сухого повітря або до $(1+d)$ кг вологого. Це пояснюється тим, що кількість сухої частини у вологому повітрі залишається незмінною при його тепловологісній обробці. Через цю особливість питомі калорійні параметри вологого повітря позначають прописними (великими) літерами на відміну від питомих параметрів окремих речовин, що відносяться до 1 кг цієї ж речовини та позначаються малими літерами. Важливим питанням при розрахунках процесів, що відбуваються у вологому повітрі, є визначення його ентальпії. Питома ентальпія вологого повітря – це кількість теплоти, яка міститься у вологому повітрі при заданих температурі та тиску і яка віднесена до 1 кг сухого повітря. Вона вимірюється у кДж/кг сухого повітря. Позначимо її літерою I . Використовують також позначення H . Виходячи з того, що ентальпія суміші дорівнює сумі ентальпій її компонентів, запишемо рівняння для визначення питомої ентальпії вологого повітря для загального випадку:

$$I = i_{\text{СП}} + i_{\text{ВП}}d + i_{\text{В}}d_{\text{В}} + i_{\text{Л}}d_{\text{Л}} \quad (9.6)$$

де I – ентальпія вологого повітря, кДж/кг сухого повітря; $i_{\text{СП}}, i_{\text{ВП}}, i_{\text{В}}, i_{\text{Л}}$ – питомі ентальпії сухого повітря, водяної пари, води та льоду, кДж/кг; $d, d_{\text{В}}, d_{\text{Л}}$ – кількість водяної пари, крапельної вологи та льоду в 1 кг сухого повітря, кг [10].

9.2. Психрометр

Для виміру вологості повітря часто використовують прилад, який називається психрометром. Він складається (рис. 9.2) з двох ртутних термометрів – сухого та так званого мокрого. Мокрий термометр відрізняється від сухого тим, що його ртутний шарик обгорнутий тканиною, що змочена водою. При вимірюванні шарики термометрів обдуваються повітрям. При цьому сухий термометр буде показувати температуру вологого повітря t , а мокрий – температуру води, що знаходиться у вологій тканині, якою обгорнуто його ртутний шарик $t_{\text{М}}$. Стабілізація температури вологої тканини, встановлюється при температурі, дещо більшій, ніж температура точки роси повітря. Цю температуру називають температурою мокрого термометра. Вона є важливим параметром, що характеризує стан вологого повітря [10].

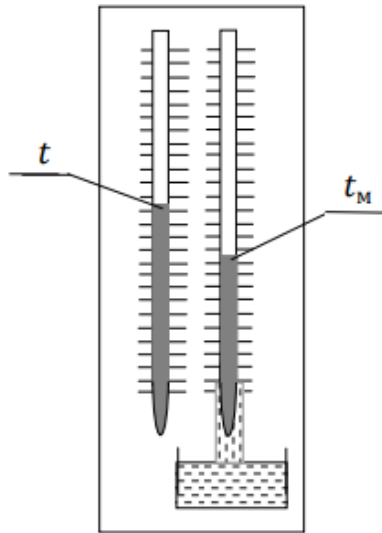


Рисунок 9.2 – Загальний вигляд психрометра

9.3. Визначення стану та параметрів вологого повітря

Параметри та стан вологого повітря найпростіше встановлювати за допомогою його $I - d$ –діаграми, де I – питома ентальпія вологого повітря, кДж /кг сухого повітря, d – вологовміст вологого повітря, кг /кг сухого повітря (рис. 9.3) [1].

Суттєвою відмінністю $I - d$ –діаграми є те, що координатні осі на ній розташовані під кутом 135° при вертикальній осі ординат. Таке розташування осей забезпечує достатню відстань між різними лініями на діаграмі та робить її зручною при користуванні.

На діаграмі нанесені такі лінії:

сталого вологовмісту $d = \text{const}$;

сталого ентальпії $I = \text{const}$;

ізотерми вологого повітря $t = \text{const}$;

сталого відносної вологості повітря $\varphi = \text{const}$;

сталого температури мокрого термометра $t_m = \text{const}$.

Лінії $d = \text{const}$ на діаграмі – це прямі вертикальні лінії.

Лінії $I = \text{const}$ являють собою прямі, що спрямовані паралельно до осі d та йдуть під кутом 135° до осі ординат.

Ізотерми в області ненасиченого вологого повітря відображаються похилими прямими, що близькі до паралельних.

Особливістю діаграми є те, що на осі ординат чисельно співпадають значення питомої ентальпії в кДж /кг сухого повітря та температури вологого повітря в $^\circ\text{C}$, тобто вісь ентальпій одночасно виконує роль осі температур.

Лінії сталої відносної вологості повітря $\varphi = \text{const}$ відображаються на діаграмі плавними кривими, що підіймаються у напрямку зростання d . При цьому очевидно, що відносній вологості $\varphi = 0$ відповідає вологовміст $d = 0$,

тобто лінія $\varphi = 0$ на діаграмі співпадає з віссю I . Отже, на $I - d$ – діаграмі вісь ординат виконує три функції – вона є віссю ентальпій, віссю температур та лінією сталої відносної вологості повітря $\varphi = 0$.

Лінія сталої максимальної відносної вологості $\varphi = 100\%$, яка відповідає насиченому вологому повітрю, відділяє область ненасиченого вологого повітря, яка знаходиться над нею, від області існування перенасиченого вологого повітря (області туману), що розташована нижче за неї. Ця лінія при зростанні d асимптотично наближається до ізотерми $100\text{ }^\circ\text{C}$.

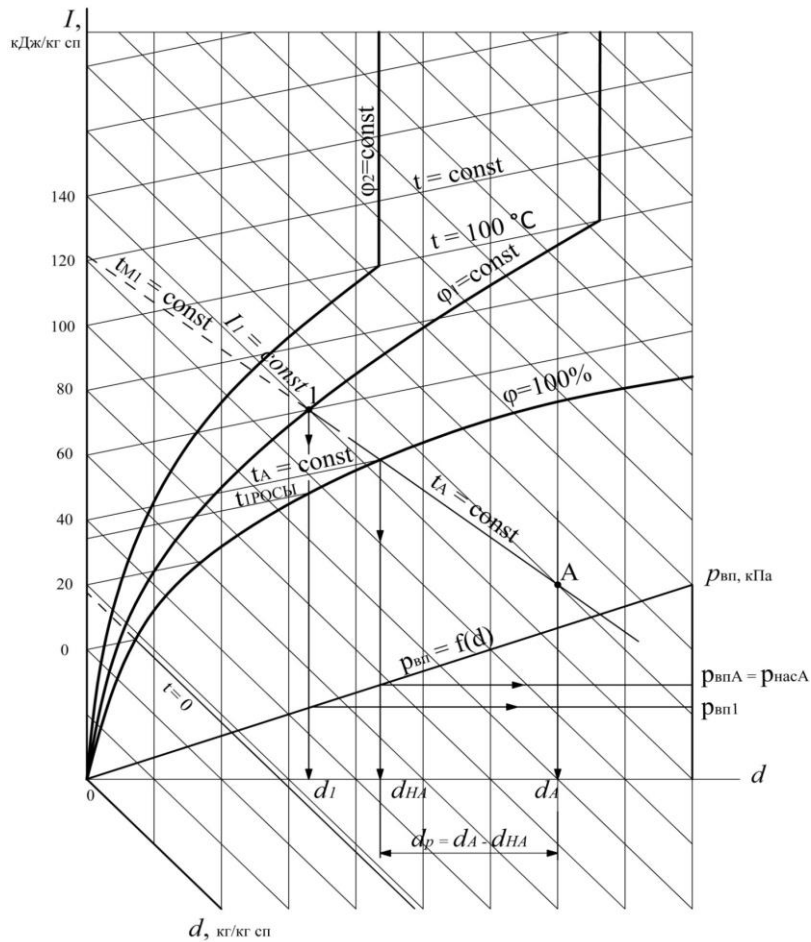


Рисунок 9.3 – $I-d$ – діаграма вологого повітря

Ізотерми вологого повітря при переході з області ненасиченого в область перенасиченого повітря на лінії $\varphi = 100\%$ зазнають зламу і зменшують кут нахилу до осі d . В області перенасиченого повітря ізотерма $0\text{ }^\circ\text{C}$ співпадає з ізоентальпою. Зважаючи на невеликий діапазон зміни температур для області туману, можна вважати, що в цій області ізотерми при $t > 0\text{ }^\circ\text{C}$ теж близькі за своїм напрямом до ліній [10].

Лінії сталої температури мокрого термометра $t_m = \text{const}$ в області ненасиченого вологого повітря отримують із ізотерм $t = \text{const}$, розрахованих

і побудованих в області перенасиченого повітря, шляхом продовження їх у область ненасиченого вологого повітря (вище лінії $\varphi = 100\%$) у вигляді прямих пунктирних ліній. Це пояснюється тим, що в області перенасиченого повітря показання сухого та мокрого термометрів психрометра будуть однаковими і відповідатимуть температурі насиченого (перенасиченого) вологого повітря. Значення температур мокрого термометра або вказують безпосередньо на лініях $t_m = \text{const}$, або їх знаходять на шкалі температур вологого повітря як температури для точок перетину відповідних пунктирних ліній з лінією $\varphi = 100\%$.

Для надання повної інформації про вологе повітря на $I - d$ –діаграму накладають прямокутну діаграму $p_{\text{вп}} = f(d)$, яка відображає залежність парціального тиску водяної пари у вологому повітрі від його вологовмісту. Через те, що повний тиск вологого повітря p , тобто атмосферний тиск, значно перевищує парціальний тиск водяної пари $p_{\text{вп}}$, то ця залежність являє собою практично пряму лінію. Цю діаграму розміщують у нижній частині $I - d$ –діаграми в області перенасиченого вологого повітря. Обидві діаграми мають спільну вісь d , а вісь $p_{\text{вп}}$ розташована на правій межі діаграми $I - d$.

При розв'язанні задачі за відомими двома параметрами вологого повітря на діаграмі знаходиться точка, що відповідає заданому стану. Величини інших параметрів дорівнюють їх значенням на відповідних ізолініях, що проходять через знайдену точку.

Нехай, наприклад, температура сухого термометра психрометра $t_1 = 60$ °С, а мокрого термометра – $t_{m1} = 40$ °С. У цьому разі стан повітря характеризує точка перетину вказаних ізотерм – точка 1 на $I - d$ –діаграмі. Ця точка знаходиться вище лінії $\varphi = 100\%$, отже вологе повітря ненасичене вологою. За ізолініями, які проходять через цю точку, встановлюємо, що ентальпія вологого повітря $I_1 = 140$ кДж/кг сухого повітря, його вологовміст d_1 , відносна вологість φ_1 , температура точки роси $t_{1\text{роси}} = 32$ °С – це температура для точки перетину лінії $d_1 = \text{const}$ з лінією насиченого повітря $\varphi = 100\%$ [10].

Парціальний тиск водяної пари $p_{\text{вп}1}$ знаходимо за діаграмою $p_{\text{вп}} = f(d)$

9.4. Питання для самоконтролю

9.4.1. Що називають вологим повітрям?

9.4.2. Охарактеризуйте парціальні тиски водяної пари та сухого повітря, що входять до складу вологого повітря.

9.4.3. Що називається температурою точки роси вологого повітря?

9.4.4. Охарактеризуйте абсолютну та відносну вологості повітря.

9.4.5. Що називають вологовмістом повітря?

9.4.6. Назвіть основні параметри вологого повітря та одиниці їх виміру.

9.4.7. Що вимірюють психрометром та як він побудований? У чому полягає принцип дії психрометра?

9.4.8. Який має вигляд $I - d$ – діаграма вологого повітря?Що за лінії на ній зображені?

9.4.9. Як визначають параметри вологого повітря за допомогою $I - d$ – діаграми?

9.4.10. Як визначають парціальний тиск водяної пари за допомогою $I - d$ – діаграми вологого повітря?

9.5. Приклади розв'язування задач

9.5.1. Температура сухого термометра психрометра $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$, температура мокрого термометр $t_M = 35\text{ }^\circ\text{C}$. Визначити стан повітря, його ентальпію, вологовміст, відносну вологість, температуру точки роси, парціальний тиск водяної пари в повітрі. Показати місцезнаходження точки, що характеризує вологе повітря на $I - d$ – діаграмі.

Розв'язання

Відображаємо схематично на $I - d$ – діаграмі відомі ізотерми сухого та мокрого термометрів (рис. 9.4). Знаходимо ентальпію вологого повітря, завдяки ізоентальпії $I = const$, яка проходить через точку перетину ізотерми температури вологого термометра та лінії сталої відносної вологості $\phi = 100\%$. Точка перетину знайденої ізоентальпії та ізотерми температури сухого термометра (рис. 9.4, т.1) є точкою, яка характеризує стан вологого повітря за вихідними даними. Вологе повітря – ненасичене, оскільки точка знаходиться вище лінії сталої відносної вологості $\phi = 100\%$.

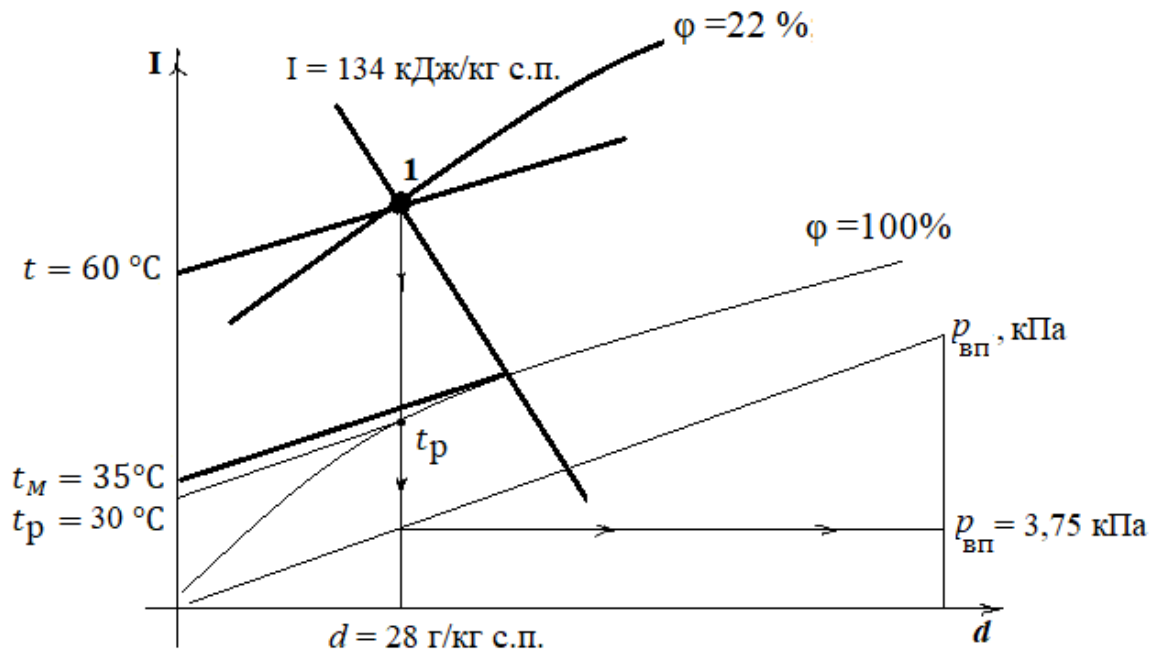


Рисунок 9.4 – $I - d$ – діаграма до задачі 9.5.1

Знаходимо за $I - d$ – діаграмою інші параметри, які характеризують стан повітря:

- відносну вологість, визначивши значення кривої сталої відносної вологості, яка проходить через т.1 – $\varphi = 22\%$;
- вологовміст, провівши вертикаль на вісь абсцис від т.1 – $d = 28$ г/кг с.п.;
- температуру точки роси, яка визначається ізотермою, яка проходить через точку перетину лінії сталого вологовмісту $d = 28$ г/кг с.п. та кривої сталої відносної вологості $\varphi = 100\%$ (рис. 9.4) – $t_p = 30$ °С;
- парціальний тиск водяної пари знаходимо за діаграмою $p_{вп} = f(d)$ – $p_{вп} = 3,75$ кПа.

9.5.2. Питома ентальпія вологого повітря $I = 60$ кДж/кг сухого повітря, його температура $t = 30$ °С. Визначити стан повітря, його вологовміст, відносну вологість, температуру мокрого термометра психрометра, температуру точки роси, парціальний тиск водяної пари в повітрі. Показати місцезнаходження точки, що характеризує вологе повітря, на $I - d$ – діаграмі.

Розв'язання

Для розв'язання задачі використовуємо $I - d$ –діаграму. Знаходимо ізолінії відомих нам значень параметрів вологого повітря. Після нанесення ізотерми $t = 30$ °С, та ізоентальпи $I = 60$ кДж/кг можна побачити, що ці дві лінії перетинаються в т. 1 (рис. 9.5), яка характеризує стан вологого повітря за вихідними даними. Вологе повітря – ненасичене, оскільки точка знаходиться вище лінії сталої відносної вологості $\varphi = 100\%$.

Далі знаходимо інші невідомі параметри для заданого стану вологого повітря:

- відносну вологість, визначивши значення кривої сталої відносної вологості, яка проходить через т.1 – $\varphi = 42\%$;
- вологовміст, провівши вертикаль на вісь абсцис від т.1 – $d = 11,7$ г/кг с.п.;
- температуру точки роси, яка визначається ізотермою, яка проходить через точку перетину лінії сталого вологовмісту $d = 11,7$ г/кг с.п. та кривої сталої відносної вологості $\varphi = 100\%$ (рис. 9.4) – $t_p = 16$ °С;
- парціальний тиск водяної пари знаходимо за діаграмою $p_{вп} = f(d)$ – $p_{вп} = 1,82$ кПа.
- температуру мокрого термометра. Ізотерма, яка проходить через точку перетину ізоентальпи $I = 60$ кДж/кг та лінії сталої відносної вологості 100 % відображає значення $t_p = 16$ °С.

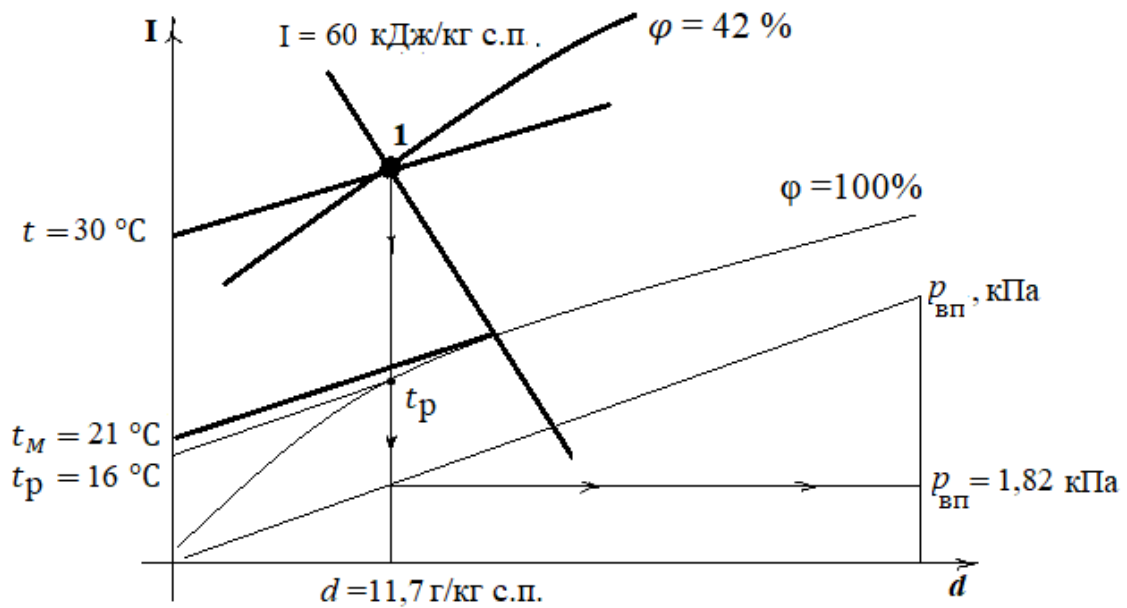


Рисунок 9.5 – $I - d$ – діаграма до задачі 9.5.2

9.5.3. До якої температури необхідно підігріти повітря, яке знаходиться при $t_1 = 60^\circ\text{C}$ та відносній вологості $\phi_1 = 35\%$, без осушення, що його вологість стала дорівнювати $\phi_2 = 10\%$. Визначити стан та параметри вологого повітря після підігріву.

Розв'язання

Для розв'язання задачі використовуємо $I - d$ –діаграму. Знаходимо ізолінії відомих нам значень параметрів вологого повітря. Після нанесення ізотерми $t_1 = 60^\circ\text{C}$, та лінії сталої відносної вологості $\phi_1 = 30\%$, можна побачити, що ці дві лінії перетинаються в т. 1 (рис. 9.6), яка характеризує стан вологого повітря за вихідними даними. Вологе повітря – ненасичене, оскільки точка знаходиться вище лінії сталої відносної вологості $\phi = 100\%$.

Щоб знайти точку, яка буде характеризувати стан вологого повітря після підігріву без осушення (підігрів при сталому вологовмісті), необхідно з т.1 піднятися по лінії $d = \text{const}$ до перетину з відповідною кривою сталої відносної вологості $\phi_2 = 10\%$. Процес 1-2 – нагрівання повітря (рис. 9.6).

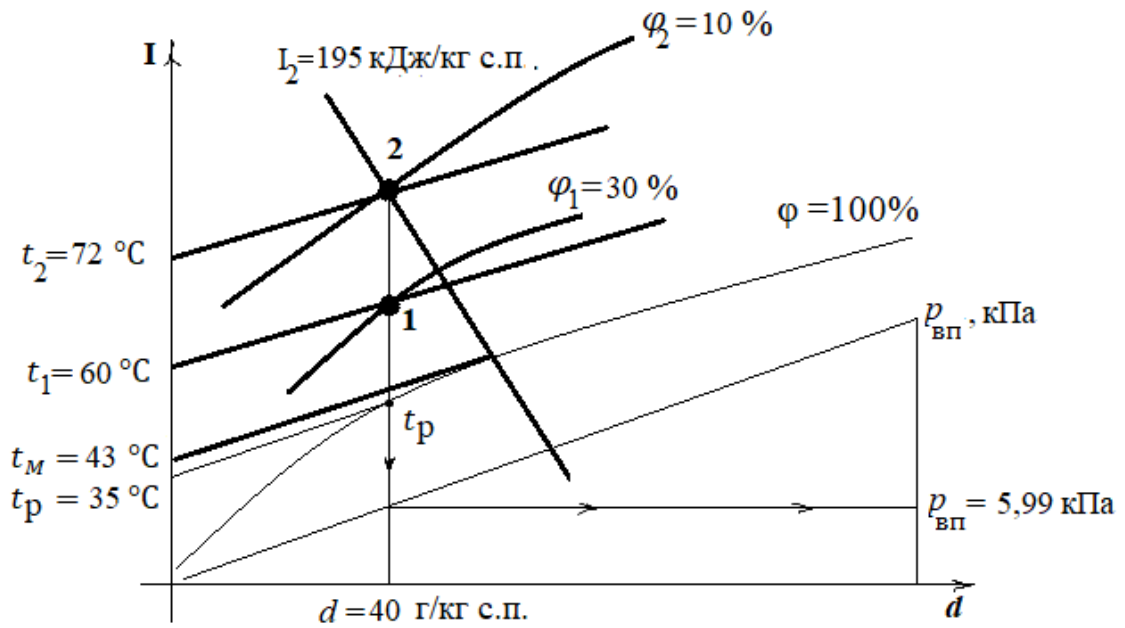


Рисунок 9.6 – $I - d$ – діаграма до задачі 9.5.3

Далі знаходимо інші невідомі параметри для стану вологого повітря в т.2:

- вологовміст, провівши вертикаль на вісь абсцис від т.2 – $d = 40$ г/кг с.п.;
- ентальпію вологого повітря знаходимо по ізоентальпі, яка проходить через точку 2 – $I_2 = 195$ кДж/кг с.п.;
- температуру точки роси, яка визначається ізотермою, яка проходить через точку перетину лінії сталого вологовмісту $d = 40$ г/кг с.п. та кривої сталої відносної вологості $\varphi = 100\%$ (рис. 9.6) – $t_p = 35$ °С;
- парціальний тиск водяної пари знаходимо за діаграмою $p_{вп} = f(d)$ – $p_{вп} = 5,99$ кПа.
- температуру мокрого термометра – за ізотермою, яка проходить через точку перетину ізоентальпи $I_2 = 195$ кДж/кг та лінії сталої відносної вологості 100 % – $t_p = 35$ °С.

9.5.4. На скільки зміниться вологовміст повітря після його охолодження від $t_1 = 55$ °С при відносній вологості $\varphi_1 = 20$ % до $t_2 = 20$ °С? Визначити стан вологого повітря після його охолодження та парціальний тиск водяної пари.

Розв'язання

Для розв'язання задачі використовуємо $I - d$ – діаграму. Знаходимо ізолінії відомих нам значень параметрів вологого повітря. Після нанесення ізотерми $t_1 = 55$ °С, та лінії сталої відносної вологості $\varphi_1 = 20$ %, можна побачити, що ці дві лінії перетинаються в т. 1 (рис. 9.7), яка характеризує стан вологого повітря за вихідними даними.

Щоб знайти точку, яка буде характеризувати стан вологого повітря після охолодження, необхідно з т.1 опуститися по лінії $d = \text{const}$ до перетину з кривою сталої відносної вологості $\varphi = 100\%$ і далі по ізолінії насиченого повітря рухатися до перетину з відповідною ізотермою $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Процес 1-2 – охолодження повітря (рис. 9.7). Вологе повітря в т.2 – насичене, оскільки точка знаходиться на лінії сталої відносної вологості $\varphi = 100\%$.

Далі знаходимо значення вологовмісту на початку та в кінці процесу охолодження:

- провівши вертикаль на вісь абсцис від т.1 – $d_1 = 20$ г/кг с.п.;
- провівши вертикаль на вісь абсцис від т.2 – $d_2 = 14,05$ г/кг с.п..

Вологовміст повітря після охолодження змінився на

$$\Delta d = d_1 - d_2 = 20 - 14,05 = 5,95 \text{ г/кг с.п.}$$

Парціальний тиск водяної пари після охолодження повітря знаходимо за діаграмою $p_{\text{вп}} = f(d)$: $p_{\text{вп}2} = 2,3$ кПа,

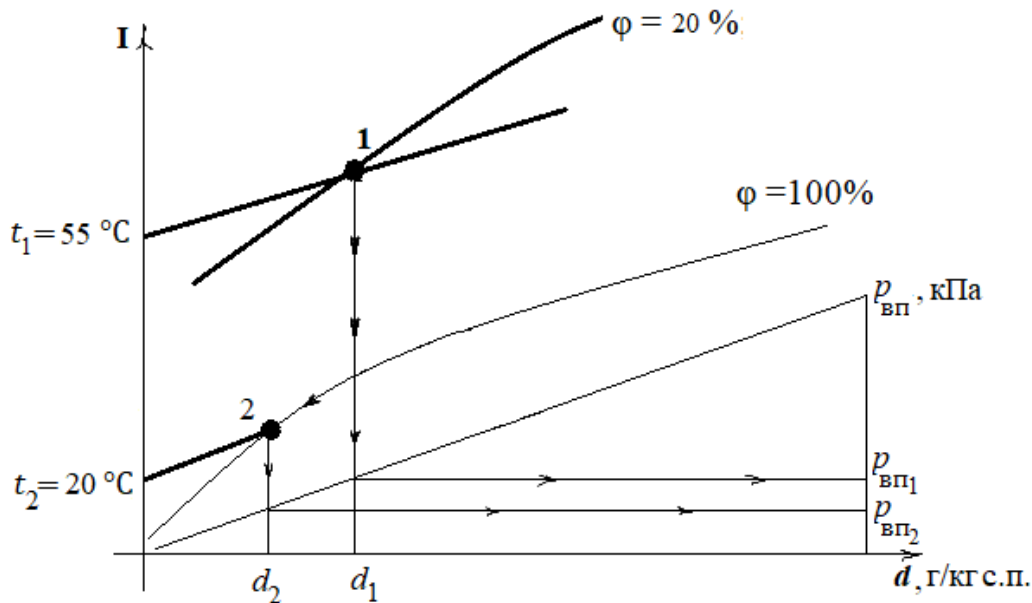


Рисунок 9.7 – $I - d$ – діаграма до задачі 9.5.4

9.6. Задачі

9.6.1. Температура вологого повітря $t, ^\circ\text{C}$, відносна вологість $\varphi, \%$. Визначити стан повітря, його ентальпію, вологовміст, температуру мокрого термометра психрометра, температуру точки роси, парціальний тиск водяної пари в повітрі. Показати місцезнаходження точки, що характеризує вологе повітря, на $I - d$ – діаграмі. Вихідні дані до задачі наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Остання цифра шифру	$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$
1	25	50
2	30	55
3	40	60
4	45	50
5	50	50
6	55	60
7	60	50
8	70	20
9	60	30
10	45	60

9.6.2. Температура сухого термометра психрометра $t, ^\circ\text{C}$, температура мокрого термометра $t_m, ^\circ\text{C}$. Визначити стан повітря, його ентальпію, вологовміст, відносну вологість, температуру точки роси, парціальний тиск водяної пари в повітрі. Показати місцезнаходження точки, що характеризує вологе повітря, на $I-d$ -діаграмі. Вихідні дані до задачі наведено в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Остання цифра шифру	$t, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$
1	20	15
2	25	20
3	30	25
4	35	25
5	40	30
6	45	30
7	55	30
8	65	40
9	60	35
10	50	30

9.6.3. Питома ентальпія вологого повітря I , кДж/кг сухого повітря, його температура $t, ^\circ\text{C}$. Визначити стан повітря, його вологовміст, відносну вологість, температуру мокрого термометра психрометра, температуру точки роси, парціальний тиск водяної пари в повітрі. Показати місцезнаходження

точки, що характеризує вологе повітря, на $I-d$ - діаграмі. Вихідні дані до задачі наведено в табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Остання цифра шифру	$t, ^\circ\text{C}$	$I, \text{кДж/кг сухого повітря}$
1	20	40
2	30	60
3	40	80
4	40	100
5	45	80
6	45	100
7	50	80
8	50	100
9	50	120
10	60	100

ЛІТЕРАТУРА

1. Холоменюк М.В. Термодинаміка: навч. посіб. / М.В. Холоменюк; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2017. – 106 с.

2. Бакка М.Т. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах: навч. посіб./ М.Т. Бакка, В.С. Редчиць, І.С. Редчиць; М-во освіти і науки України, Житомир. інж-технол. ін.-т. – Житомир : ЖІТІ, 2000, – 210 с.

3. Савенчук О.С. Методичні вказівки та завдання до самостійної роботи студентів заочно-дистанційної форми навчання з дисциплін теплотехнічного профілю за напрямками підготовки 6.050301 Гірництво, 6.050502 Інженерна механіка, 6.050701 Електротехніка та електротехнології, 6.050702 Електромеханіка / О.С. Савенчук, В.Г. Дерюгін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2010. – 54 с.

4. Савенчук О.С. Навчальний посібник для розв'язування задач з технічної термодинаміки для студентів заочно-дистанційної форми навчання за напрямками підготовки 6.050702 Електротехніка та електротехнології, 6.050301 Гірництво, 6.050502 Інженерна механіка, 6.050702 Електромеханіка / О.С. Савенчук, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2014. – 183 с.

5. Драганов Б.Х. Теплотехніка : підручник / Б.Х. Драганов, А.А. Долінський, А.В. Міщенко, Є.М. Письменний; за ред. Б.Х. Драганова. – Київ : ІНКООС, 2005. – 504 с.

6. Методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань бакалаврами ІЗО спеціальностей 133 Галузеве машинобудування, 184 Гірництво, спеціалізації (освітньо-професійної програми) „Енергомеханічні комплекси гірничих підприємств” з дисципліни „Гідромеханіка та термодинаміка” / І.М. Чеберячко, О.С. Савенчук, Є.О. Кириченко, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 58 с.

7. Дерюгін В.Г. Методичні вказівки та завдання до самостійної роботи студентів заочно-дистанційної форми навчання з дисциплін теплотехнічного профілю за напрямками підготовки 6.050502 Інженерна механіка, 6.050701 Електротехніка та електротехнології, 6.050702 Електромеханіка / В.Г. Дерюгін, О.С. Савенчук, В.Г. Шворак, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2011. – 27 с.

8. Савенчук О.С. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів заочної форми навчання з дисципліни „Пневматичні установки гірничих підприємств” та „Установки для кондиціонування повітря шахт” напряму 0902 Інженерна механіка / О.С. Савенчук, Ю.І. Оксень, Є.О. Кириченко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2002. – 63 с.

9. Оксень Ю.І. Методичні вказівки та завдання до виконання курсового проекту з розрахунку теплонасосної установки / Ю.І. Оксень, О.С. Савенчук,

В.І. Самуся, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2016. – 45 с.

10. Холоменюк М.В. Термодинаміка та теплопередача: навч. посіб. / М.В. Холоменюк; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 289 с.

11. Савенчук О.С. Методичні рекомендації для самостійної підготовки студентів до лабораторно-практичних занять з дисциплін теплотехнічного профілю за напрямками 0902 Інженерна механіка, 0903 Гірництво, 0906 Електротехніка, 0922 Електромеханіка / О.С. Савенчук, О.П. Торба; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2005. – 56 с.

12. Савенчук О.С. Завдання та приклади розрахунків теплообмінних апаратів для студентів спеціальності “Гірниче обладнання” з дисциплін “Теплообмін та теплоенергетичні установки”, “Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв”, “Теплотехнічне господарство шахт” / О.С. Савенчук, В.Г. Дерюгін, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2008. – 57 с.

13. Савенчук О.С. Методичні рекомендації, завдання та приклади розрахунку теплообмінних апаратів теплоенергетичних установок для студентів спеціальностей „Нетрадиційні та відновлені джерела енергії”, „Електромеханічні системи геотехнічних виробництв”, „Розробка родовищ та видобування корисних копалин” спеціалізації „Енергомеханічні комплекси гірничого виробництва” / О.С. Савенчук, Ю.І. Оксень, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2015. – 93 с.

14. Савенчук О.С. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи бакалаврами спеціальностей 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” спеціалізації „Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії”, 184 „Гірництво” спеціалізації (освітньо-професійної програми) „Енергомеханічні комплекси гірничого виробництва” за дисциплінами „Основи теплотехніки та енергетичні установки”, „Теплообмін та теплоенергетичні установки” / О.С. Савенчук, О.П. Трофимова; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 45 с.

15. Малишев В. В. Технічна термодинаміка та теплопередача: навч. посіб. / В.В. Малишев. – Київ : Університет "Україна", 2015. – 258 с.

16. Дубровська В.В. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб. / В.В. Дубровська, В.І. Шкляр; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ : Вид-во “Політехніка», 2016. – 152 с.

17. Мінаковський В.М. Технічна термодинаміка. Приклади, задачі та типові розрахунки. Частина перша: навч. посіб. / В.М. Мінаковський, А.С. Соломаха; за заг. ред. В.М. Мінаковського; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ : Вид-во “Політехніка», 2017. – 172 с.

ДОДАТКИ

Таблиця 1 – Міжнародна система одиниць (СІ)

Назва величини	Одиниця виміру	Позначення
Основні одиниці		
Довжина	метр	<i>м</i>
Маса	кілограм	<i>кг</i>
Час	секунда	<i>с</i>
Сила електричного струму	ампер	<i>А</i>
Термодинамічна температура	кельвін	<i>К</i>
Сила світла	кандела	<i>кд</i>
Додаткові одиниці		
Плоский кут	радіан	<i>рад</i>
Тілесний кут	стерадіан	<i>стер</i>
Похідні одиниці		
Площа	квадратний метр	<i>м²</i>
Об'єм	кубічний метр	<i>м³</i>
Густина	кілограм на метр кубічний	<i>кг/м³</i>
Швидкість	метр в секунду	<i>м/с</i>
Кутова швидкість	радіан за секунду	<i>рад/с</i>
Прискорення	метр на секунду в квадраті	<i>м/с²</i>
Сила	ньютон	<i>Н</i>
Тиск	паскаль	<i>Па</i>
Робота, енергія, кількість теплоти	джоуль	<i>Дж</i>
Потужність	ватт	<i>Вт</i>
Питома робота	джоуль на кілограм	<i>Дж/кг</i>
Питома енергія	джоуль на кілограм	<i>Дж/кг</i>
Питома теплота	джоуль на кілограм	<i>Дж/кг</i>
Ентальпія системи	джоуль	<i>Дж</i>
Питома ентальпія	джоуль на кілограм	<i>Дж/кг</i>
Ентропія системи	джоуль на кельвін	<i>Дж/К</i>
Питома ентропія	джоуль на кілограм-кельвін	<i>Дж/(кг·К)</i>
Теплоємність системи	джоуль на кельвін	<i>Дж/К</i>
Питома теплоємність	джоуль на кілограм-кельвін	<i>Дж/(кг·К)</i>

Таблиця 2 – Молекулярні маси, густини і об’єми кіломолей при нормальній умовах та газові стали найважливіших газів

Речовина	Хімічне позначення	Молекуляр-на маса μ , кг/кмоль	Густина ρ , кг/м ³	Об’єм кіло-моля V_{μ} , м ³ /кг	Газова стала R , Дж/(кг·К)
Повітря	–	28,96	1,293	22,40	287,0
Кисень	O ₂	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Гелій	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водень	H ₂	2,016	0,090	22,43	4124,0
Оксид вуглецю	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись вуглецю	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Сірчистий газ	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Етилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовий газ	–	11,50	0,515	22,33	721,0
Аміак	NH ₃	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяна пара	H ₂ O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

Таблиця 3– Приставки для позначення кратних і дільних одиниць вимірювання

Приставка		Відповідає числу основних одиниць	Скорочене позначення	
українське	міжнародне		українське	міжнародне
1	2	3	4	5
Тера	Tera	10 ¹²	<i>T</i>	<i>T</i>
Гіга	Giga	10 ⁹	<i>Г</i>	<i>G</i>
Мега	Mega	10 ⁶	<i>М</i>	<i>M</i>
Кіло	Kilo	10 ³	<i>к</i>	<i>k</i>

1	2	3	4	5
Гекто	Hekto	10^2	<i>г</i>	<i>h</i>
Дека	Deka	10	<i>дк</i>	<i>dk</i>
Деці	Deci	10^{-1}	<i>д</i>	<i>d</i>
Санті	Centi	10^{-2}	<i>с</i>	<i>c</i>
Милі	Milli	10^{-3}	<i>м</i>	<i>m</i>
Микро	Mikro	10^{-6}	<i>мк</i>	<i>μ</i>
Нано	Nano	10^{-9}	<i>н</i>	<i>n</i>
Пико	Piko	10^{-12}	<i>п</i>	<i>p</i>

Латинський алфавіт

Aa – а*Bb* – бе*Cc* – це*Dd* – де*Ee* – е*Ff* – еф*Gg* – ге*Hh* – аш*Ii* – і*Jj* – йот*Kk* – ка*Ll* – ель*Mm* – ем*Nn* – ен*Oo* – о*Pp* – пе*Qq* – ку*Rr* – ер*Ss* – ес*Tt* – те*Uu* – у*Vv* – ве*Ww* – дубль-ве*Xx* – ікс*Yy* – ігрек*Zz* – зет

Грецький алфавіт

Aα – альфа*Bβ* – бета*Γγ* – гама*Δδ* – дельта*Eε* – епсілон*Zζ* – дзета*Hη* – ета*Θθ* – тета*Iι* – іота*Kκ* – каппа*Λλ* – ламбда*Mμ* – мю*Nν* – ню*Ξξ* – ксі*Oο* – омикрон*Ππ* – пі*Ρρ* – ро*Σσ* – сигма*Ττ* – тау*Υυ* – іпсілон*Φφ* – фі*Χχ* – хі*Ψψ* – псі*Ωω* – омега

Таблиця 4 – Теплоємність кисню

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,822	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9651	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1100	36,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1600	37,480	29,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752
1800	37,945	29,630	34,834	26,519	1,0886	0,8286	1,5541	1,1832
1900	38,175	29,860	35,006	26,691	1,0940	0,8340	1,5617	1,1907
2000	38,406	30,091	35,169	26,854	1,0990	0,8390	1,5692	1,1978
2100	38,636	30,321	35,328	27,013	1,1041	0,8441	1,5759	1,2050
2200	39,858	30,543	35,483	27,168	1,1087	0,8491	1,5830	1,2121
2300	39,080	30,765	35,634	27,319	1,1137	0,8537	1,5897	1,2188
2400	39,293	30,978	35,785	27,470	1,1183	0,8583	1,5964	1,2255
2500	39,502	31,187	35,927	27,612	1,1229	0,8629	1,6027	1,2318
2600	39,708	31,393	36,069	27,754	1,1271	0,8675	1,6090	1,2380
2700	39,909	31,594	36,207	27,892	1,1313	0,8717	1,6153	1,2443

Таблиця 5 – Теплоємність азоту

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1600	35,757	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961
1800	36,100	27,775	33,055	24,740	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1900	36,247	27,922	33,218	24,903	1,1857	0,8889	1,4821	1,1112
2000	36,377	28,052	33,373	25,058	1,1911	0,8943	1,4888	1,1179
2100	36,494	28,169	33,520	25,205	1,1966	0,8997	1,4955	1,1246
2200	36,603	28,278	33,658	25,343	1,2012	0,9048	1,5018	1,1304
2300	36,703	28,378	33,787	25,472	1,2058	0,9094	1,5072	1,1363
2400	36,795	28,470	33,909	25,594	1,2104	0,9136	1,5127	1,1417
2500	36,879	28,554	34,022	25,707	1,2142	0,9177	1,5177	1,1468

Таблиця 6 – Теплоємність окису вуглецю

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7499	1,3071	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,0634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3574	0,9864
700	33,025	24,710	30,752	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	32,427	24,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948
1600	36,040	27,725	33,051	24,736	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1700	36,203	27,888	33,231	24,916	1,1865	0,8893	1,4825	1,1116
1800	36,350	28,035	33,402	25,087	1,1924	0,8956	1,4901	1,1191
1900	36,480	28,165	33,561	25,246	1,1983	0,9014	1,4972	1,1262
2000	36,597	28,282	33,708	25,393	1,2033	0,9064	1,5039	1,1329
2100	36,706	28,391	33,850	25,535	1,2083	0,9115	1,5102	1,1392
2200	36,802	28,487	33,980	25,665	1,2129	0,9161	1,5160	1,1451
2300	36,894	28,579	34,106	25,791	1,2175	0,9207	1,5215	1,1505
2400	36,978	28,663	34,223	25,908	1,2217	0,9249	1,5269	1,1560
2500	37,053	28,738	34,336	26,021	1,2259	0,9291	1,5320	1,1610

Таблиця 7 – Теплоємність водню

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	28,617	20,302	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9056
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,186	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,3050	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	29,941	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	30,107	21,792	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,590	24,275	30,288	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9981
1500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964
1600	33,762	25,447	30,832	22,517	15,294	11,169	1,3754	1,0044
1700	34,114	25,799	31,012	22,697	15,383	11,258	1,3833	1,0124
1800	34,445	26,130	31,192	22,877	15,472	11,347	1,3917	1,0207
1900	34,763	26,448	31,372	23,057	15,561	11,437	1,3996	1,0287
2000	35,056	26,741	31,548	23,233	15,649	11,524	1,4076	1,0366
2100	35,332	27,017	31,723	23,408	15,736	11,611	1,4151	1,0442
2200	35,605	27,290	31,891	23,576	15,819	11,694	1,4227	1,0517
2300	35,852	27,537	32,058	23,743	15,902	11,798	1,4302	1,0593
2400	36,090	27,775	32,222	23,907	15,983	11,858	1,4373	1,0664
2500	36,316	28,001	32,385	24,070	16,064	11,937	1,4449	1,0739
2600	36,530	28,215	32,540	24,225	16,141	12,016	1,4516	1,0806
2700	36,731	28,416	32,691	24,376	16,215	12,091	1,4583	1,0873

Таблиця 8 – Теплоємність вуглекислого газу

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,815	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,618	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,2644
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	1,1995	1,0107	2,3555	1,9845
1700	60,022	51,707	53,218	44,903	1,2091	1,0203	2,3743	2,0034
1800	60,269	51,954	53,604	45,289	1,2179	1,0291	2,3915	2,0205
1900	60,478	52,163	53,959	45,644	1,2259	1,0371	2,4074	2,0365
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	1,2334	1,0446	2,4221	2,0511
2100	60,801	52,486	54,596	46,281	1,2405	1,0517	2,4359	2,0649
2200	60,918	52,603	54,881	46,566	1,2468	1,0580	2,4484	2,0775
2300	61,006	52,691	55,144	46,829	1,2531	1,0639	2,4602	2,0892
2400	61,060	52,745	55,391	47,076	1,2586	1,0697	2,4710	2,1001
2500	61,085	52,770	55,617	47,302	1,2636	1,0748	2,4811	2,1101

Таблиця 9 – Теплоємність сірчистого газу

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	38,85	30,52	38,85	30,52	0,607	0,477	1,733	1,361
100	42,41	34,08	40,65	32,32	0,636	0,507	1,813	1,440
200	45,55	37,22	42,33	34,00	0,662	0,532	1,888	1,516
300	48,23	39,90	43,88	35,55	0,687	0,557	1,955	1,587
400	50,24	41,91	45,22	36,89	0,708	0,578	2,018	1,645
500	51,71	43,38	46,39	38,06	0,724	0,595	2,068	1,700
600	52,88	44,55	47,35	39,02	0,737	0,607	2,114	1,742
700	53,76	45,43	48,23	39,90	0,754	0,624	2,152	1,779
800	54,43	46,10	48,94	40,61	0,762	0,632	2,181	1,813
900	55,01	46,68	49,61	41,28	0,775	0,645	2,215	1,842
1000	55,43	47,10	50,16	41,83	0,783	0,653	2,236	1,867
1100	55,77	47,44	50,66	42,33	0,791	0,662	2,261	1,888
1200	56,06	47,73	51,08	42,75	0,795	0,666	2,278	1,905

Таблиця 10 – Теплоємність повітря

Темпе- ратура	Мольна теплоємність в кДж/(кмоль·К)				Масова теплоємність в кДж/(кг·К)		Об'ємна теплоємність в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312

1	2	3	4	5	6	7	8	9
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	31,862	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618
1300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	1,1501	0,8633	1,4867	1,1158
1900	36,509	28,194	33,482	25,167	1,1560	0,8688	1,4939	1,1229
2000	36,655	28,340	33,641	25,326	1,1610	0,8742	1,5010	1,1296
2100	36,798	28,483	33,787	25,472	1,1664	0,8792	1,5072	1,1363
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	1,1710	0,8843	1,5135	1,1426
2300	37,053	28,738	34,060	25,745	1,1757	0,8889	1,5194	1,1484
2400	37,170	28,855	34,185	25,870	1,1803	0,8930	1,5253	1,1543
2500	37,279	28,964	34,307	25,992	1,1840	0,8972	1,5303	1,1593

Таблиця 11 – Середня теплоємність в інтервалі від t_1 до t_2 (лінійна залежність)

Газ	Питома масова теплоємність, c_{xm} , кДж/(кг·К)	Питома об'ємна теплоємність, c'_{xm} , кДж/(м ³ ·К)
1	2	3
Повітря	$c_{vm} = 0,7088 + 0,000093(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 0,9157 + 0,0001201(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 0,9956 + 0,000093(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,287 + 0,0001201(t_1 + t_2)$
H ₂	$c_{vm} = 10,12 + 0,0005945(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 0,9094 + 0,0000523(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 14,33 + 0,0005945(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,28 + 0,0000523(t_1 + t_2)$
N ₂	$c_{vm} = 0,7304 + 0,00008955(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 0,9131 + 0,0001107(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 1,032 + 0,00008955(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,306 + 0,0001107(t_1 + t_2)$

1	2	3
O ₂	$c_{vm} = 0,6594 + 0,0001065(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 0,943 + 0,0001577(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 0,919 + 0,0001065(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,313 + 0,0001577(t_1 + t_2)$
CO	$c_{vm} = 0,7331 + 0,00009681(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 0,9173 + 0,000121(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 1,035 + 0,00009681(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,291 + 0,000121(t_1 + t_2)$
H ₂ O	$c_{vm} = 1,372 + 0,000311(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 1,102 + 0,0002498(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 1,8333 + 0,000311(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,473 + 0,0002498(t_1 + t_2)$
CO ₂	$c_{vm} = 0,6837 + 0,0002406(t_1 + t_2)$	$c'_{vm} = 1,3423 + 0,0004723(t_1 + t_2)$
	$c_{pm} = 0,8725 + 0,0002406(t_1 + t_2)$	$c'_{pm} = 1,7132 + 0,0004723(t_1 + t_2)$
Примітка: найбільше значення $t_2 = 1500$ °C		

Таблиця 12 – Параметри сухої насиченої водяної пари та води на кривій насичення (стосовно значень тиску)

p , бар	t , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/кг·К	s'' , кДж/кг·К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,15	54,00	0,0010140	10,02	0,0998	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,25	64,99	0,0010199	6,200	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,40	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,50	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593
0,60	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,70	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,80	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,90	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
1,1	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
1,4	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
1,9	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
2,0	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
2,8	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2524	2167	1,660	7,003
3,0	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
7,0	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
8,0	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
9,0	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
10,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
11,0	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13,0	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
14,0	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
15,0	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
16,0	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
17,0	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
19,0	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
20,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
21,0	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
22,0	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
23,0	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
25,0	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
26,0	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
27,0	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
28,0	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
29,0	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
30,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
34	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
36	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,740	6,113
38	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
40	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
48	261,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
65	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
70	285,80	0,0013510	0,02731	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
75	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
85	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
90	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
130	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
160	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
200	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Примітка. Параметри критичного стану: $t_{кр} = 374,15 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{кр} = 221,29 \text{ бар}$;
 $v_{кр} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Таблиця 13 – Параметри сухої насиченої водяної пари та води на кривій насичення (стосовно значення температури)

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ бар}$	$v', \text{ м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{ м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{ кг/м}^3$	$i', \text{ кДж/кг}$	$i'', \text{ кДж/кг}$	$r, \text{ кДж/кг}$	$s', \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$	$s'', \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,01	0,006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2501	2501	0	9,1544
5	0,008719	0,0010001	147,200	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	0,012277	0,0010004	106,420	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	0,017041	0,0010010	77,970	0,012820	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	0,023370	0,0010018	57,840	0,017290	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	0,031660	0,0010030	43,400	0,023040	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
30	0,042410	0,0010044	32,930	0,030370	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	0,056220	0,0010061	25,240	0,039620	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	0,073750	0,0010079	19,550	0,051150	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	0,095840	0,0010099	15,280	0,065440	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	0,123350	0,0010121	12,040	0,083060	209,3	2592	2383	0,7038	0,0753
55	0,157400	0,0010145	9,578	0,1044	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901
60	0,199170	0,0010171	7,678	0,1302	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
65	0,250100	0,0010199	6,201	0,1613	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	0,311700	0,0010228	5,045	0,1982	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	0,385500	0,0010258	4,133	0,2420	314,0	2635	2321	1,0157	7,6815
80	0,473600	0,0010290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	0,578100	0,0010324	2,828	0,3536	355,9	2651	2295	1,1342	7,5438
90	0,7011	0,0010359	2,361	0,4235	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	0,8451	0,0010396	1,982	0,5045	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	1,0132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
105	1,2079	0,0010474	1,419	0,7047	440,2	2683	2243	1,3632	7,2959
110	1,4326	0,0010515	1,210	0,8264	461,3	2691	2230	1,4184	7,2387
115	1,6905	0,0010559	1,036	0,9652	482,5	2698	2216	1,4733	7,1832
120	1,9854	0,0010603	0,8917	1,121	503,7	2706	2202	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777
130	2,7011	0,0010997	0,6683	1,496	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272
135	3,130	0,0010747	0,5820	1,718	567,5	2727	2159	1,6869	6,9781
140	3,614	0,0010798	0,5087	1,966	589,0	2734	2145	1,7392	6,9304
145	4,155	0,0010851	0,4461	2,242	610,5	2740	2130	1,7907	6,8839
150	4,760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746	2114	1,8418	5,8383
155	5,433	0,0010962	0,3466	2,885	653,9	2753	2099	1,8924	6,7940
160	6,180	0,0011021	0,3068	3,258	675,5	2758	2082	1,9427	6,7508
165	7,008	0,0011081	0,2725	3,670	697,3	2763	2066	1,9924	6,7081
170	7,920	0,0011144	0,2426	4,122	719,2	2769	2050	2,0417	6,6666
175	8,925	0,0011208	0,2166	4,617	741,1	2773	2032	2,0909	6,6256
180	10,027	0,0011275	0,1939	5,157	763,1	2778	2015	2,1395	6,5858
185	11,234	0,0011344	0,1739	5,750	785,2	2782	1997	2,1876	6,5465
190	12,553	0,0011415	0,1564	6,394	807,5	2786	1979	2,2357	6,5074
195	13,989	0,0011489	0,1409	7,097	829,9	2790	1960	2,2834	6,4694
200	15,551	0,0011565	0,1272	7,862	852,4	2793	194	2,3308	6,4318
205	17,245	0,0011644	0,1151	8,688	875,0	2796	1921	2,3777	6,3945
210	19,080	0,0011726	0,10430	9,588	897,7	2798	1900	2,4246	6,3577
215	21,062	0,0011812	0,09465	10,56	920,7	2800	1879	2,4715	6,3212
220	23,201	0,0011900	0,08606	11,62	943,7	2802	1858	2,5179	6,2849
225	25,504	0,0011992	0,07837	12,76	966,9	2802	1835	2,5640	6,2488
230	27,979	0,0012087	0,07147	13,99	990,4	2803	1813	2,6101	6,2133
235	30,635	0,0012187	0,06527	15,32	1013,9	2804	1790	2,6561	6,1780
240	33,480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803	1766	2,7021	6,1425
245	36,524	0,0012399	0,05462	18,30	1061,6	2803	1741	2,7478	6,1073
250	39,776	0,0012512	0,05006	19,98	1085,7	2801	1715	2,7934	6,0721
255	43,25	0,0012631	0,04591	21,78	1110,2	2799	1689	2,8394	6,0366
260	46,94	0,0012755	0,04215	23,72	1135,1	2796	1661	2,8851	6,0013
265	50,87	0,0012886	0,03872	25,83	1160,2	2794	1634	2,9307	5,9657

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
270	55,05	0,0013023	0,03560	28,09	1185,3	2790	1605	2,9764	5,9297
275	59,49	0,0013168	0,03274	30,53	1210,7	2785	1574,2	3,0223	5,8938
280	64,91	0,0013321	0,03013	33,19	1236,9	2780	1542,9	3,0681	5,8573
285	69,18	0,0013483	0,02774	36,05	1263,1	2773	1510,2	3,1146	5,8205
290	74,45	0,0013655	0,02554	39,15	1290,0	2766	1476,3	3,1611	5,7827
295	80,02	0,0013839	0,02351	42,53	1317,2	2758	1441,0	3,2079	5,7443
300	85,92	0,0014036	0,021640	46,21	1344,9	2749	1404,2	3,2548	5,7049
305	92,14	0,0014250	0,019920	50,20	1373,1	2739	1365,6	3,3026	5,6647
310	98,70	0,0014470	0,018320	54,58	1402,1	2727	1325,2	3,3508	5,6233
315	105,61	0,0014720	0,016830	59,42	1431,7	2714	1282,3	3,3996	5,5802
320	112,90	0,0014990	0,015450	64,72	1462,1	2700	1237,8	3,4495	5,5353
325	120,57	0,0015290	0,014170	70,57	1493,6	2684	1190,3	3,5002	5,4891
330	128,65	0,0015620	0,012970	77,10	1526,1	2666	1139,6	3,5522	5,4412
335	137,14	0,0015990	0,011840	84,46	1559,8	2646	1085,7	3,6056	5,3905
340	146,08	0,0016390	0,010780	92,76	1594,7	2622	1027,0	3,6605	5,3361
345	155,48	0,0016860	0,009771	102,34	1639	2596	963,5	3,7184	5,2769
350	165,37	0,0017410	0,008803	113,6	1671	2565	893,5	3,7786	5,2117
355	175,77	0,0018070	0,007869	127,1	1714	2527	813,0	3,8439	5,1385
360	186,74	0,0018940	0,006943	144,0	1762	2481	719,3	3,9162	5,0530
365	198,30	0,0020200	0,00599	166,8	1817	2421	603,5	4,0000	4,9463
370	210,53	0,0022200	0,004930	203	1893	2331	438,4	4,1137	4,7951
374	225,22	0,0028000	0,003470	288	485,3	512,7	27,4	1,0332	1,0755

Примітка. Параметри критичного стану: $t_{кр} = 374,15 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{кр} = 221,29 \text{ бар}$;
 $v_{кр} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Таблиця 14 – Параметри води та перегрітої водяної пари

P , бар	t , °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,04	v	0,0010018	36,12	38,45	40,75	43,07	45,39	47,69	50,01	52,31	54,63
	i	83,7	2574	2612	2650	2688	2726	2764	2803	2841	2880
	s	0,2964	8,537	8,651	8,762	8,867	8,966	9,060	9,150	9,238	9,321
0,08	v	0,0010018	0,0010079	19,19	20,34	21,50	22,66	23,82	24,97	26,13	27,29
	i	83,7	167,5	2612	2650	2688	2726	2764	2802	2841	2880
	s	0,2964	0,5715	8,331	8,441	8,546	8,645	8,740	8,830	8,917	9,000
0,10	v	0,0010018	0,0010079	15,35	16,27	17,20	18,13	19,06	19,98	20,90	21,83
	i	83,7	167,5	2611	2649	2688	2726	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,227	8,337	8,442	8,542	8,636	8,727	8,814	8,897
0,12	v	0,0010018	0,0010079	12,78	13,55	14,33	15,10	15,87	16,64	17,42	18,19
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,143	8,253	8,358	8,457	8,552	8,643	8,730	8,813
0,14	v	0,0010018	0,0010079	10,95	11,61	12,27	12,94	13,60	14,26	14,92	15,58
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,071	3,181	8,287	8,386	8,481	8,572	8,659	8,742
0,16	v	0,0010018	0,0010079	9,573	10,16	10,740	11,320	11,899	12,478	13,057	13,635
	i	83,7	167,5	2610	2649	2687	2725	2,763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,009	8,120	8,225	8,324	8,419	8,510	8,597	8,680
0,20	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	8,119	8,58	9,049	9,513	9,977	10,441	10,905
	i	83,7	167,5	251,1	2648	2687	2725	2763	2801	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	0,8307	8,015	8,120	8,220	8,315	8,406	8,493	8,576
0,30	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	5,400	5,713	6,025	6,335	6,645	6,955	7,264
	i	83,7	167,5	251,1	2646	2685	2724	2762	2801	2839	2878
	s	0,2964	0,5715	0,8307	7,825	7,931	8,031	8,126	8,217	8,304	8,388
1,0	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	0,0010289	1,695	1,795	1,889	1,984	2,078	2,172
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	2676	2717	2757	2796	2835	2875
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	7,361	7,465	7,662	7,654	7,743	7,828
1,2	v	0,0010018	0,0010079	0,0010171	0,0010289	0,0010434	1,491	1,572	1,650	1,729	1,807
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	419,0	2715	2755	2795	2834	2874
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	1,3067	7,376	7,475	7,568	7,657	7,742
6,0	v	0,0010015	0,0010076	0,0010168	0,0010287	0,0010432	0,0010601	0,0010797	0,3167	0,3348	0,3520
	i	84,3	167,9	251,5	335,2	419,1	503,7	589,1	2759	2805	2849
	s	0,2964	0,7516	0,8302	1,0744	1,3062	1,5265	1,738	6,767	6,869	6,963
8,0	v	0,0010015	0,0010076	0,0010167	0,0010286	0,0010431	0,0010600	0,0010795	0,0011020	0,2473	0,2609
	i	84,5	168,1	251,7	335,3	419,2	503,8	589,1	675,3	2792	2839
	s	0,2962	0,5714	0,8300	1,0742	1,306	1,5263	1,737	1,941	6,715	6,814

10,0	v	0,0010014	0,0010075	0,0010166	0,0010285	0,0010430	0,0010598	0,0010794	0,0011018	0,1949	0,2060
	i	84,7	168,3	251,8	335,4	419,3	503,9	589,2	675,4	2778	2827
	s	0,296	0,5712	0,8298	1,0740	1,3058	1,5261	1,737	1,941	6,588	6,692
12,0	v	0,0010013	0,0010074	0,0010165	0,0010284	0,0010429	0,0010597	0,0010793	0,0011016	0,1645	0,1693
	i	84,9	168,5	251,9	335,5	419,4	504,0	589,3	675,5	2790	2816
	s	0,2959	0,5711	0,8297	1,0738	1,3056	1,5259	1,737	1,940	6,534	6,588
14,0	v	0,0010012	0,0010073	0,0010164	0,0010282	0,0010427	0,0010596	0,0010792	0,0011015	0,0011271	0,1429
	i	85,1	168,7	252,1	335,7	419,6	504,2	569,5	675,7	763,2	2803
	s	0,2958	0,5710	0,8296	1,0736	1,3054	1,5257	1,736	1,94	2,137	6,497
16,0	v	0,0010011	0,0010072	0,0010163	0,0010282	0,0010426	0,0010595	0,0010790	0,0011013	0,0011270	0,0011565
	i	85,3	168,8	252,2	335,8	419,7	504,3	589,6	675,7	763,2	852,4
	s	0,2958	0,5710	0,8296	1,0735	1,3052	1,5256	1,736	1,94	2,137	2,329
18,0	v	0,0010010	6,0010071	0,0010162	0,0010281	0,0010425	0,0010594	0,0010789	0,0011012	0,0011268	0,0011562
	i	85,5	169,0	252,4	336,0	419,9	504,5	589,8	675,8	763,2	852,4
	s	0,2957	0,5709	0,8295	1,0733	1,3050	1,5254	1,736	1,939	2,136	2,328
20,0	v	0,0010009	0,0010070	0,0010161	0,0010280	0,0010424	0,0010593	0,0010787	0,0011011	0,0011267	0,0011561
	i	85,7	169,2	252,6	336,2	420,1	504,7	589,9	675,9	763,2	852,4
	s	0,2957	0,5708	0,8294	1,0731	1,3048	1,5252	1,736	1,939	2,136	2,328
30	v	0,0010004	0,0010065	0,0010157	0,0010275	0,0010419	0,0010587	0,0010782	0,0011004	0,0011258	0,0011551
	i	86,7	170,1	253,5	337,0	420,9	505,4	590,6	676,4	763,7	852,6
	s	0,2956	0,5707	0,829	1,0726	1,3038	1,6244	1,735	1,938	2,134	2,326
80	v	0,000983	0,0010043	0,0010134	0,0010254	0,0010398	0,0010564	0,0010754	0,0010972	0,0011220	0,0011504
	i	91,3	174,6	257,8	341,2	424,9	509,1	593,9	679,6	766,7	855,0
	s	0,2943	0,5686	0,8260	1,0689	1,2996	1,5198	1,730	1,931	2,126	2,317
90	v	0,0009978	0,0010038	0,0010129	0,0010249	0,0010393	0,0010559	0,0010749	0,0010966	0,0011213	0,0011496
	i	92,3	175,5	258,7	342,1	425,7	509,8	594,6	680,3	767,4	855,5
	s	0,2941	0,5681	0,8253	1,0682	1,2988	1,5189	1,729	1,930	2,125	2,316
100	v	0,0009975	0,0010031	0,0010125	0,0010245	0,0010386	0,0010552	0,0010741	0,0010956	0,0011201	0,0011482
	i	93,2	176,9	259,6	342,9	426,5	510,5	595,3	681,0	768,0	856,0
	s	0,2939	0,5674	0,8247	1,0676	1,2982	1,5182	1,728	1,929	2,123	2,314
120	v	0,0009965	0,0010024	0,0010116	0,0010236	0,0010379	0,0010544	0,0010732	0,0010946	0,0011189	0,0011622
	i	95,1	178,2	261,4	344,6	428,1	512,0	596,7	682,4	769,1	901,6
	s	0,2935	0,5668	0,8236	1,0662	1,2967	1,5165	1,727	1,921	2,121	2,404
130	v	0,0009961	0,0010020	0,0010112	0,0010231	0,0010373	0,0010538	0,0010725	0,0010936	0,0011182	0,0011458
	i	96,0	179,0	262,2	345,4	428,9	512,7	597,4	683,0	769,7	851,4
	s	0,2931	0,5664	0,823	1,0655	1,2959	1,5156	1,726	1,926	2,119	2,309
140	v	0,0009957	0,0010018	0,0010108	0,0010226	0,0010368	0,0010533	0,0010719	0,0010932	0,0011174	0,0011448
	i	96,9	179,9	263,0	346,2	429,6	513,4	598,0	683,6	770,2	857,9
	s	0,2930	0,5660	0,8224	1,0648	1,2951	1,5148	1,724	1,925	2,118	2,308
160	v	0,0009948	0,0010007	0,0010099	0,0010217	0,0010359	0,0010522	0,0010707	0,0010918	0,0011157	0,0011430
	i	98,9	181,7	264,7	347,9	431,2	514,9	599,4	684,9	771,3	858,8
	s	0,2925	0,5653	0,8212	1,0634	1,2937	1,5131	1,722	1,922	2,116	2,305

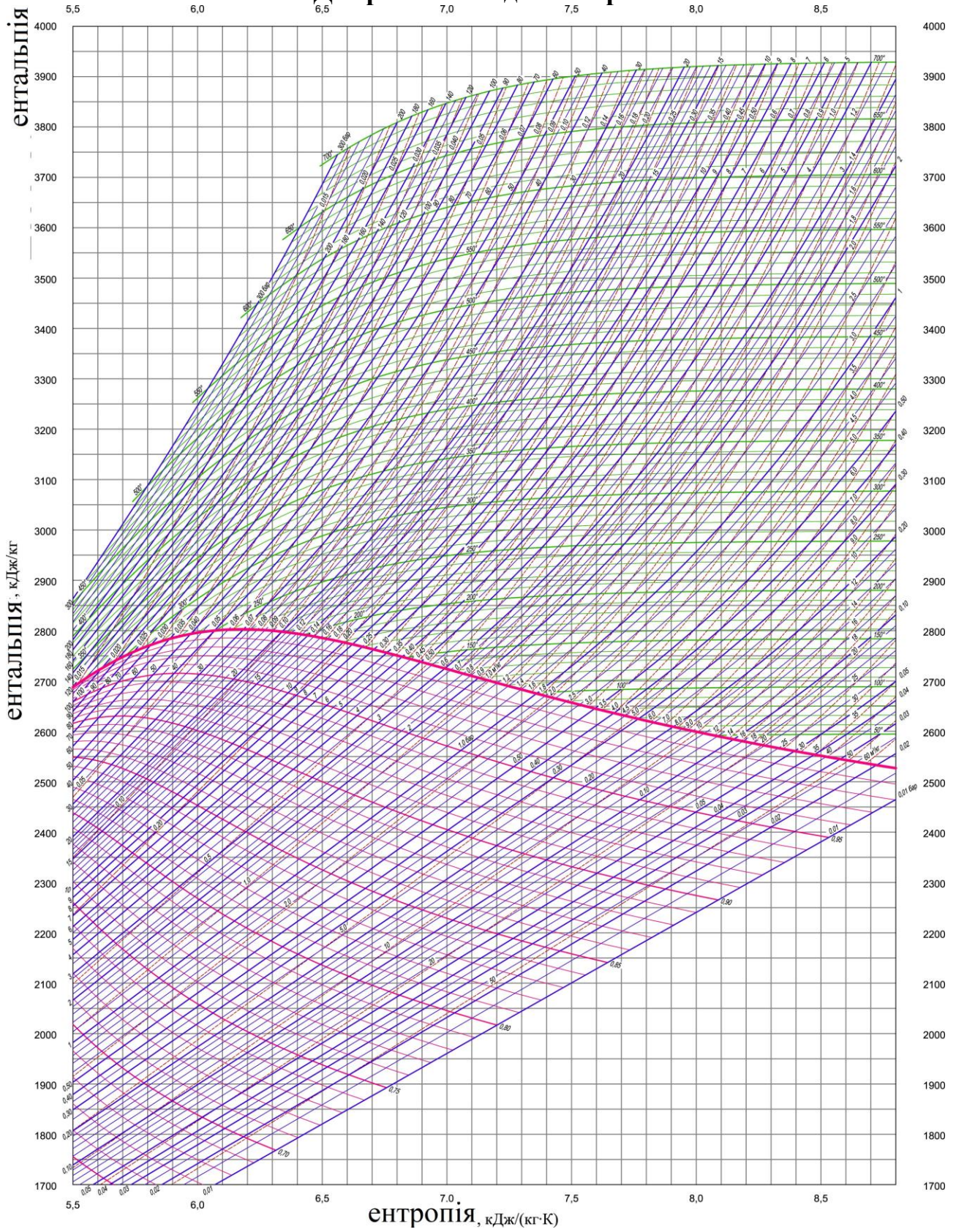
Продовження табл. 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
240	v	0,0009912	0,0009949	0,0010065	0,0010182	0,0010320	0,0010479	0,0010660	0,0010864	0,0011096	0,0011357
	i	106,4	188,8	271,5	354,3	437,2	520,8	604,9	689,9	775,7	862,6
	s	0,2911	0,5625	0,8169	1,0582	1,2881	1,5062	1,715	1,915	2,108	2,295
300	v	0,0009886	0,0009949	0,0010041	0,0010156	0,0010293	0,0010458	0,0010626	0,0010822	0,0011050	0,0011305
	i	112,0	194,1	276,5	359,1	441,9	525,1	609,0	693,6	779,1	865,4
	s	0,2902	0,5603	0,8140	1,0545	1,2834	1,5024	1,709	1,908	2,100	2,287
p, бар	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,04	v	56,93	59,24	61,56	63,81	66,18	71,96	77,73	85,31	89,28	100,84
	i	2918	2958	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,402	9,479	9,554	9,627	9,698	9,866	10,024	10,174	10,317	10,585
0,08	v	28,44	29,60	30,75	31,90	33,06	35,94	38,84	41,72	44,61	50,38
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,081	9,159	9,234	9,306	9,377	9,546	9,704	9,854	9,991	10,265
0,10	v	22,76	23,68	24,60	25,53	26,46	28,76	31,08	33,39	35,70	40,32
	i	2918	2957	2997	3037	3071	3177	3280	3384	3490	37,07
	s	8,978	9,056	9,131	9,203	9,274	9,443	9,601	9,751	9,895	10,162
0,12	v	18,96	19,73	20,50	21,27	22,04	23,96	25,89	27,82	29,74	33,60
	i	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,894	8,972	9,047	9,119	9,190	9,239	9,517	9,667	9,810	10,078
0,14	v	16,24	16,90	17,66	18,22	18,88	20,53	22,18	29,83	25,49	28,79
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,823	8,900	8,975	9,048	9,119	9,288	9,446	9,596	9,739	10,007
0,16	v	14,213	14,790	15,367	15,943	16,52	17,96	19,41	20,85	22,29	26,18
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,761	8,838	8,913	8,986	9,057	9,226	0,384	9,534	9,678	9,945
0,20	v	11,369	11,832	12,295	12,758	13,220	14,376	15,530	16,68	17,82	20,15
	i	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3701
	s	8,657	8,735	8,810	8,883	8,954	9,123	9,281	9,431	9,575	9,842
0,30	v	7,573	7,882	8,191	8,500	8,809	9,580	10,351	11,121	11,891	13,430
	i	2917	2956	2996	3036	3076	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,469	8,547	8,622	8,695	8,766	8,935	9,093	9,244	9,388	9,655
1,0	v	2,266	2,359	2,452	2,545	2,638	2,871	3,102	3,334	3,565	4,028
	i	2914	2954	2693	3033	3074	3175	3278	3382	3488	3706
	s	7,910	7,988	8,064	8,183	8,211	8,381	8,541	8,690	8,333	9,097
1,2	v	1,886	1,964	2,042	2,120	2,197	2,391	2,584	2,777	2,970	3,357
	i	2913	2953	2993	3033	3073	3174	3278	3382	3488	3705
	s	7,824	7,903	7,979	8,053	8,126	8,296	8,456	8,606	8,749	9,013
6,0	v	0,3688	0,3855	0,4019	0,4181	0,4342	0,4741	0,5135	0,5528	0,5919	0,6697
	i	2891	2933	2975	3017	3039	3164	3270	3376	3483	3701
	s	7,051	7,135	7,215	7,292	7,366	7,541	7,704	7,857	8,001	8,266

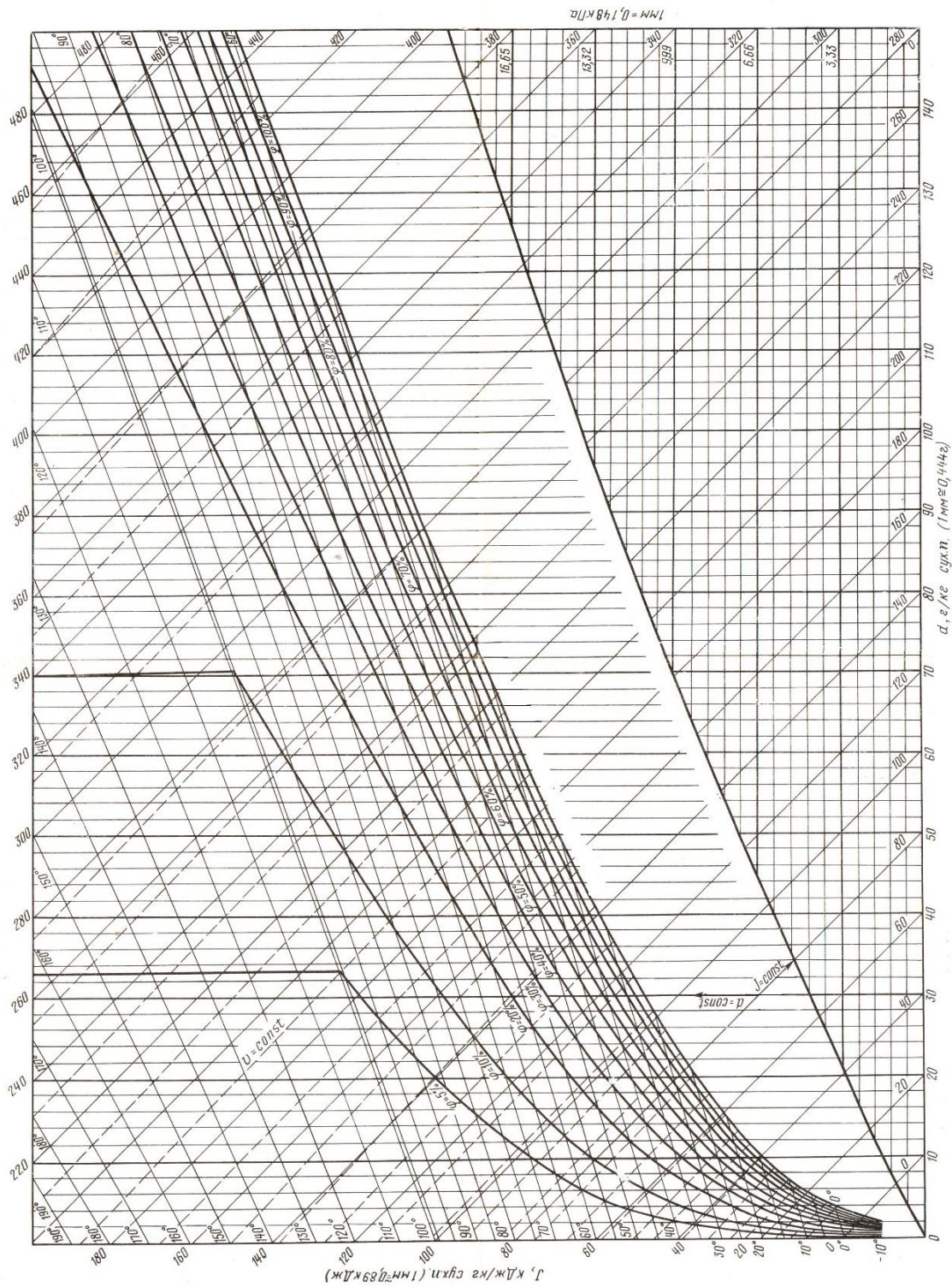
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8,0	v	0,2739	0,2867	0,2993	0,3118	0,3240	0,3542	0,3842	0,4137	0,4432	0,5018
	i	2883	2926	2969	3011	3054	3160	3267	3373	3481	3699
	s	6,905	6,991	7,073	7,151	7,226	7,404	7,568	7,722	7,866	8,132
10,0	v	0,2169	0,2274	0,2377	0,2478	0,2578	0,2822	0,3065	0,3303	0,3539	5,4016
	i	28,74	2918	2962	3005	3048	3156	3263	3370	3479	3698
	s	6,788	6,877	6,961	7,040	7,116	7,296	7,461	7,615	7,761	8,027
12,0	v	0,1788	0,1879	0,1967	0,2054	0,2139	0,2343	0,2547	0,2747	0,2944	0,3339
	i	2865	2911	2955	2999	3042	3151	3260	3368	3477	3696
	s	6,688	6,780	6,866	6,947	7,025	7,206	7,373	7,529	7,674	7,942
14,0	v	0,1515	0,1596	0,1673	0,1748	0,1823	0,2001	0,2176	0,2349	0,2520	0,2858
	i	2855	2902	2948	2992	3036	3147	3256	3365	3474	3695
	s	6,602	6,697	6,784	6,867	6,945	7,130	7,299	7,455	7,601	7,870
16,0	v	0,1309	0,1382	0,1452	0,1519	0,1585	0,1743	0,1899	0,2051	0,2201	0,2499
	i	2844	2893	2940	2986	3030	3142	3253	3363	3472	3693
	s	6,524	6,622	6,711	6,796	6,877	7,063	7,233	7,390	7,537	7,806
18,0	v	0,1149	0,1216	0,1280	0,1341	0,1401	0,1545	6,1683	0,1819	0,1953	0,2219
	i	2883	2884	2932	2979	3025	3138	3249	3360	3470	3691
	s	6,452	6,554	6,646	6,732	6,814	7,003	7,175	7,333	7,480	7,750
20,0	v	0,1021	0,1084	0,1143	0,1200	0,1255	0,1384	0,1511	0,1634	0,1755	0,1995
	i	2821	2875	2924	2972	3019	3134	3246	3357	3468	3690
	s	6,385	6,491	6,585	6,674	6,757	6,949	7,122	7,282	7,429	7,701
30	v	0,0011891	0,006826	0,07294	0,07720	0,08119	0,09051	0,09929	0,1078	0,1161	0,1325
	i	943,5	2823	2882	2937	2988	3111	3229	3343	3456	3682
	s	2,514	6,225	6,337	6,438	6,530	6,735	6,916	7,080	7,231	7,506
80	v	0,0011833	0,0012221	0,0012689	0,0013275	0,02429	0,03003	0,03438	0,03821	0,04177	0,04844
	i	945,1	1037,9	1134,4	1235,4	2784	2985	3135	3270	3397	3640
	s	2,504	2,688	2,873	3,059	5,788	6,126	6,358	6,552	6,722	7,019
90	v	0,0011822	0,0012207	0,0012669	0,0013246	0,0014016	0,02586	0,03001	0,03354	0,03680	0,04285
	i	946,2	1038,1	1134,2	1234,9	1344,3	2954	3114	3254	3386	3631
	s	2,502	2,686	2,870	3,056	3,249	6,033	6,280	6,481	6,656	6,957
100	v	0,0011805	0,0012185	0,0012650	0,0013217	0,0013970	0,02247	0,02646	0,02979	0,03281	0,03837
	i	945,8	1038,3	1134,1	1234,5	1342,2	2920	3093	3239	3372	3621
	s	2,500	2,684	2,868	3,053	3,244	5,940	6,207	6,416	6,596	6,901
120	v	0,0011788	0,0012184	0,0012616	0,0013164	0,0013886	0,01726	0,02113	0,24140	0,02681	0,03163
	i	946,6	1038,7	1133,9	1233,7	1340	2844	3049	3206	3347	3603
	s	2,497	2,680	2,863	3,046	3,235	5,755	6,071	6,298	6,487	6,803
130	v	0,0011777	0,0012150	0,0012593	0,0013137	0,0013847	0,01514	0,01905	0,82197	0,02450	0,02903
	i	946,9	1038,9	1133,8	1233,3	1339	2799	3026	3189	3334	3694
	s	2,495	2,678	2,860	3,043	3,230	6,657	6,006	6,243	6,438	6,758

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
140	v	0,0011766	0,0012136	0,0012575	0,0013111	0,0013808	0,01325	0,01726	0,02010	0,02252	0,02683
	i	947,3	1039,1	1183,8	1232,9	1338,0	2750	3000	3172	3321	3585
	s	2,493	2,676	2,858	3,040	3,226	5,556	5,942	6,190	6,390	6,716
160	v	0,0011744	0,0012109	0,0012539	0,0013061	0,0013735	0,00978	0,01429	0,01704	0,01930	0,02322
	i	948,0	1039,5	1133,7	1232,2	1336,2	2612	2945	3137	3294	3567
	s	2,489	2,672	2,853	3,035	3,218	5,302	5,816	6,090	6,303	6,640
240	v	0,0011658	0,0012004	0,0012404	0,0012883	0,0013475	0,001612	0,00676	0,00977	0,01174	0,01478
	i	950,9	1041,3	1134	1230,3	1331,2	1625	2638	2971	3174	3493
	s	2,477	2,657	2,835	3,011	3,190	3,684	5,236	5,723	5,999	6,394
300	v	0,0011597	0,0011931	0,0012313	0,0012764	0,0013311	0,001556	0,00283	0,00672	0,00869	0,01144
	i	953,3	1042,9	1134,7	1229,0	1329,0	1608	2155	2816	3073	3434
	s	2,468	2,647	2,822	2,996	3,171	3,640	4,476	5,446	5,799	6,242

Діаграма $h-s$ водяної пари



Діаграма I-d вологого повітря



Навчальне видання

Фелоненко Станіслав Васильович
Ільїна Інна Сергіївна
Трофимова Олена Павлівна
Комісаров Юрій Олексійович
Бобришов Олександр Олексійович

ПРАКТИКУМ З ТЕРМОДИНАМІКИ

Навчальний посібник

Видано в авторській редакції.

Підписано до друку 16.05.2024. Формат 60x84¹/₁₆
Папір офсетний. Друк цифровий. Обл.-вид. арк. 14,0.
Ум. друк. арк. 13,1. Наклад 100 прим. Зам. № 807

Підготовлено до видання в Національному
технічному університеті «Дніпровська політехніка»

Видавництво «Журфонд»
49000, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 684 від 21.11.2001 р.

Віддруковано: ПП Вахмістров О.Є.,
м. Дніпро, вул. Писаржевського, буд. 18

П69 **Практикум з термодинаміки:** навч. посіб. / С.В. Фелоненко, І.С. Ільїна, О.П. Трофимова, Ю.О. Комісаров, О.О. Бобришов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Журфонд, 2024. – 224 с.

ISBN 978-966-934-585-1

Розглянуто основні закони термодинаміки, термодинамічні процеси, цикли теплових та холодильних машин, властивості ідеальних газів і водяної пари, процеси витікання й дроселювання газів і парів. До кожної теми подано короткий огляд теоретичних відомостей про ідеальні й реальні гази, а також рекомендації до розв'язування задач з прикладами і задачі для самостійного розв'язування. Матеріали доповнено необхідними довідковими даними та питаннями для самоконтролю.

Видання адресовано здобувачам денної та заочної форм навчання спеціальності «Гірництво».

УДК 536 (075.8)