



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, роботехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інтегрованих електротехнологій та енергетичного
машинобудування

ТЕРМОДИНАМІКА СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Частина 1

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

для здобувачів денної та заочної форм навчання
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності
142 Енергетичне машинобудування

Харків 2024

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, роботехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування

ТЕРМОДИНАМІКА СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Частина 1

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

для здобувачів денної та заочної форм навчання
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності
142 Енергетичне машинобудування

Затверджено рішенням
Науково-методичної ради факультету енергетики,
роботехніки та комп'ютерних технологій
Протокол № 3 від 26.12.2024 р.

Харків 2024

УДК 621.1.016.7

T 22

Схвалено на засіданні кафедри
інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування
Протокол № 9 від 14 листопада 2024 р

Рецензенти:

А. О. Пак – доктор технічних наук, проф. Державного біотехнологічного університету

T-22 Термодинаміка складних систем: частина 1, метод. вказівки до виконання практич. робіт, для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заоч. форм навч. спец. 142 Енергетичне машинобудування ; Держ. біотехнол. ун-т; уклад.: В.О. Потапов, Д.В. Білий – Харків : [б. в.], 2024.– 95 с.

Методичні вказівки включають 9 практичних робіт та список літератури до них . Практичні заняття є важливою ланкою в підготовці студентів до самостійної інженерної діяльності. Для того, щоб практичні заняття досягли мети, студенти повинні завчасно і систематично готуватися до занять; проявляти самостійність при рішенні задач; розуміти результати їх рішення.

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 142 Енергетичне машинобудування.

УДК 621.1.016.7

**Відповідальний за випуск: В.О. Потапов, д-р техн. наук
Д. В. Білий, асистент**

© Потапов В.О, Білий Д.В, 2024
© ДБТУ, 2024

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| 1. ОСНОВНІ ТЕРМІЧНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ | 5 |
| 1.1. Задачі | 9 |
| 1.2. Контрольні питання..... | 12 |
| 2. ЗАКОНИ І РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ. СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ..... | 13 |
| 2.1. Задачі | 15 |
| 2.2. Контрольні питання..... | 18 |
| 3. ТЕПЛОЄМКОСТІ ГАЗІВ І ГАЗОВИХ СУМІШІВ..... | 19 |
| 3.1. Задачі | 21 |
| 3.2. Контрольні питання..... | 24 |
| 4. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ЗАКРИТОЇ СИСТЕМИ | 26 |
| 4.1. Задачі | 26 |
| 4.2. Контрольні питання..... | 27 |
| 5. ПОЛІТРОПНІ ПРОЦЕСИ ЗМІНИ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ..... | 29 |
| 5.1. Задачі | 31 |
| 5.2. Особливості розрахунку процесів ідеальних газів при обліку впливу температури на їх ізобарну та ізохорну теплоємності..... | 38 |
| 5.3. Задачі | 41 |
| 5.4. Контрольні питання..... | 42 |
| 6. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ І ВОДЯНОГО ПАРА. ПРОЦЕСИ ВОДЯНОГО ПАРУ | 43 |
| 6.1. Задачі | 49 |
| 6.2. Контрольні питання..... | 56 |
| 7. Вологе повітря..... | 58 |
| 7.1. Задачі | 64 |
| 7.2. Контрольні питання..... | 70 |
| 8. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ..... | 72 |
| 8.1. Задачі | 74 |
| 8.2. Контрольні питання..... | 79 |
| 9. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ПОТОКУ. РОБОТА ЗМІНИ ТИСКУ У ПОТОКУ. ЕКСЕРГІЯ У ПОТОКУ..... | 81 |
| 9.1. Задачі | 85 |
| 9.2. Контрольні питання | 90 |
| ДОДАТКИ..... | 92 |
| БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК..... | 98 |

1. ОСНОВНІ ТЕРМІЧНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ

Термодинамічна система характеризується певними значеннями її властивостей. Ці властивості термодинамічного тіла називаються параметрами стану.

Параметр стану – будь-яка величина, властива тілу, зміна якої визначається лише початковим і кінцевим станами тіла і залежить від характеру процесу зміни його стану під час переходу тіла з першого стану до другого.

Усі термодинамічні параметри введені людиною задля зручності вивчення навколишнього світу. Однак не всі параметри піддаються виміру приладами. Ряд параметрів, що не піддаються виміру, людина ввела для зручності розрахунку термодинамічних процесів. Ці параметри виходять розрахунковим шляхом і мають розмірність величину роботи (енергії) джоуль або калорія. Наприклад, до них відносяться ентальпія та ентропія. Такі параметри отримали назву енергетичних чи калоричних параметрів, чи функцій стану. Параметри, які можна виміряти приладами, називаються термічними. До основних термічних параметрів стану відносяться: питомий об'єм, тиск та температура.

Питомий обсяг

Питомий обсяг – це обсяг одиниці маси речовини ($\text{м}^3/\text{кг}$):

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1.1)$$

де V - об'єм тіла, м^3 ; m – маса тіла, кг .

Величина, зворотна питомому обсягу, називається щільністю ($\text{кг}/\text{м}^3$):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}. \quad (1.2)$$

У практиці часто використовується поняття частки – це вага одиниці об'єму тіла ($\text{Н}/\text{м}^3$):

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g, \quad (1.3)$$

де g – прискорення вільного падіння (приблизно $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$).

При перекладі будь-якої величини з несистемною розмірністю в СІ, керуються наступним правилом: множать цю величину на еквівалент її одиниці в СІ, який отримується заміною одиниць несистемних складових параметра величинами, еквівалентними СІ, і виконують з ними арифметичні дії операторами розмірності. Наприклад, для перекладу з $\text{г}/\text{см}^3$ в СІ необхідно

$$\gamma = 1 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} = \frac{9,81 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 9,81 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

При цьому треба пам'ятати, що $1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$. Цим співвідношенням часто користуються під час перекладу несистемних одиниць СІ.

Тиск

Тиск – це силовий вплив (F) тіла та його частин на навколишнє середовище або оболонку та на сусідні частини того ж тіла, що припадає на одиницю поверхні (S). Ця силова дія спрямована перпендикулярно до будь-якого елемента поверхні і врівноважується назад спрямованим силовим впливом навколишнього середовища, оболонки або сусіднього елемента того ж тіла.

$$p = \frac{F}{S}$$

У СІ використовується одиниця тиску паскаль (Па), це 1 Н/м^2 , тобто сила в один ньютон, що діє по нормалі до поверхні площею один квадратний метр. Па. Вибір цієї одиниці виміру тиску пояснюється тим, що атмосферний тиск повітря на поверхні Землі приблизно дорівнює одному бару.

У техніці часто використовується одиниця виміру тиску у старій системі (СГС) – технічна атмосфера $1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2$ (не плутати з поняттям фізичної атмосфери).

Часто вимірюють тиск, особливо невеликий, висотою стовпа рідини (ртуть, вода, спирт тощо). Стовп рідини робить на дно судини тиск, що визначається рівністю

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\rho g H S}{S} = \rho g H, \quad (1.4)$$

де ρ – густина рідини, кг/м^3 ;

H – висота стовпа рідини, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

F, S – сила, що діє на дно судини, та площа поверхні дна.

З рівняння (1.4) випливає, що тиск p відповідає висоті стовпа рідини $H = p / (\rho g)$, тобто, висота H прямо пропорційна тиску, оскільки ρg – величина стала.

На практиці висоту стовпа рідини часто беруть для оцінки тиску. Тому метри та міліметри стовпа рідини стали одиницями вимірювання тиску. Для переходу від висоти стовпа рідини до паскалів необхідно у формулу (1.4) підставити всі величини СІ.

Наприклад, у земних умовах густина води при $4 \text{ }^\circ\text{C}$ становить 1000 кг/м^3 , ртуті при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ – 13595 кг/м^3 . Підставивши ці величини у формулу (1.4), отримаємо співвідношення для 1мм стовпа цих рідин і тиску Па:

$$H = 1 \text{ мм вод. ст.} \text{ відповідає } p = 103 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 9,81 \text{ Па};$$

$$H = 1 \text{ мм рт. ст.} \text{ відповідає } p = 13595 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 133,37 \text{ Па}.$$

При визначенні тиску заввишки стовпа рідини необхідно враховувати зміну її густини залежно від температури. Це слід робити для порівняння результатів вимірювання тиску. Так, при визначенні атмосферного тиску за допомогою

ртутного барометра його показання наводяться до 0 °С виходячи із співвідношення

$$V_0 = V \cdot (1 - 0,000172 \cdot t), \quad (1.5)$$

де - дійсна висота ртутного стовпа барометра при температурі ртуті t °С;

V_0 – показання барометра, що наведені до 0 °С.

У розрахунках використовуються тиски стовпів рідини, що наведені до 0 °С.

Вимірювання тиску в техніці засновано на показаннях різних приладів, що діють за принципом відображення на шкалі величини, чисельно рівної різниці тиску в місці вимірювання та тиску навколишнього середовища. на прилади для вимірювання тиску: більше атмосферного – манометри, менше атмосферного – вакуумметри.

Тиск за шкалою цих приладів називається манометричним тиском p_M та вакуум p_V відповідно. Тиск у місці виміру називається абсолютним p . Тиск навколишнього середовища називається тиском атмосферного повітря або барометричним, оскільки прилади, як правило, встановлені в навколишньому атмосферному повітрі.

Розрахункові залежності тиску приладів такі:

манометричний тиск

$$p_M = p - V, \quad (1.6)$$

де p_M - манометричний тиск (за приладом);

p - абсолютний тиск,

V – тиск атмосферного повітря (барометричний);

вакуум

$$p_V = V - p, \quad (1.7)$$

де p_V – вакуум (показання вакуумметра).

Параметром стану термодинамічного тіла є абсолютний тиск, при використанні приладів воно визначатиметься залежно від приладу за такими залежностями:

для манометра

$$p = p_M + V, \quad (1.8)$$

для вакуумметра

$$p = V - p_V. \quad (1.9)$$

Співвідношення одиниць вимірювання тиску

Окрім одиниць СІ у техніці використовуються й інші одиниці вимірювання тиску. Наведемо основні з них та їх взаємозв'язок:

- 1 технічна атмосфера

$p = 1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 0,981 \text{ бар} = 10 \text{ м вод.ст.} = 735,6 \text{ мм рт.ст.};$

- 1 бар

$p = 1 \text{ бар} = 750 \text{ мм рт. ст.} = 102 \text{ м вод. ст.} = 1,02 \text{ кгс/см}^2.$

У фізиці використовується поняття фізичної атмосфери – це тиск, що відповідає 760 мм ртутного стовпа на рівні моря за температури 0 °С:

$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 1,0333 \text{ кгс/см}^2 = 1,0133 \text{ бар}.$

Як зазначено вище, при переході від однієї одиниці виміру до іншої необхідно замінити одиниці виміру несистемних величин на відповідні їм СІ, оперуючи з ними, як з арифметичними операторами. Наприклад:

$$1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = \frac{9,81 \text{ Н}}{10^{-4} \text{ м}^2} = 9,81 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 0,981 \text{ бар}$$

Температура

Температура є мірою нагрітості тіл. У побуті температуру ототожнюють із поняттями тепло – теплий та холодно – холодний.

У технічній термодинаміці під температурою розуміється величина, пропорційна енергії руху молекул та атомів даного тіла.

Насправді переважно використовуються дві температурні шкали (рис.1.1). Перша - абсолютна шкала температур Кельвіна, її нижня межа відповідає точці абсолютного нуля, де відсутня молекулярний рух (практично недосяжна) і єдиною експериментальною точкою прийнята потрійна точка води, що лежить вище точки танення льоду при нормальному атмосферному тиску (760 мм.). 0,01 °С, цій точці присвоєно значення температури 273,16 К. Це значення вибрано для того, щоб різниця температур кипіння та танення хімічно чистої води при нормальному фізичному тиску становила 100 °С. Температура в кельвінах відповідає СІ і позначається як ТК.

Друга - стоградусна шкала температур Цельсія - широко використовується в практиці.

$$T = t + 273,15 \quad (1.10)$$

З (1.10) слід, що температурі 0 °С відповідає температура +273,15 К; а 0 К відповідає -273,15 °С.

В англomовних країнах та США використовується шкала Фаренгейта, для якої справедливе співвідношення $F = 1,8 t + 32$.

1.1. Задачі

Приклад розв'язання задачі:

1.1. Манометр газового балона показує тиск 0,9 МПа, стовпчик ртуті в барометрі має висоту 730 мм при температурі приміщенні 30 °С. Визначити абсолютний тиск газу в балоні у мегапаскалях.

Рішення

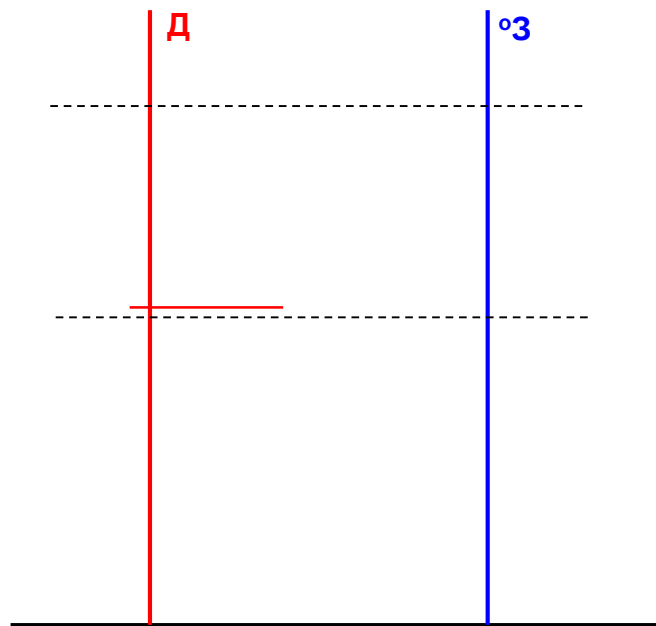


Рис.1.1. Співвідношення температурних шкал Кельвіна та Цельсія

Показ барометра отримано при температурі ртуті 30 °С. Барометричний тиск, наведений до 0 °С, складе

$$B_0 = B \cdot (1 - 0,000172 \cdot t) = 730 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 30) = 726,2 \text{ мм рт. ст.}$$

і, отже, атмосферний тиск Па буде визначатися співвідношенням $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 750 \text{ мм рт. ст.}$

$$B_0 = \frac{10^5 \cdot 726,2}{750} = 96830 \text{ Па} = 0,9683 \text{ бар} = 0,09683 \text{ МПа.}$$

Абсолютний тиск газу в балоні

$$p = B_0 + p_M = 0,09683 + 0,9 = 0,99683 \text{ МПа.}$$

1.2. У посудині місткістю 0,4 м³ знаходиться 0,8 кг газу. Визначити його питомий об'єм, щільність та питому вагу СІ.

Відповідь: $v=0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$, $\rho=2 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\gamma=19,62 \text{ Н}/\text{м}^3$.

1.3. Манометр парового котла показує тиск $15 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Показання ртутного барометра при температурі котельні $25 \text{ }^\circ\text{C}$ становлять 750 мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск у котлі в технічних атмосферах, барах та паскалях.

Відповідь: $p=16,01 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 15,7 \text{ бар} = 15,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.4. Пневматичний прес з діаметром поршня $0,4 \text{ м}$ діє з силою 635000 Н . Визначити абсолютний тиск повітря в циліндрі преса в атмосферах, барах і в паскалях, якщо барометричний тиск $= 745 \text{ мм рт. ст.}$

Відповідь: $p=52,6 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 51,55 \text{ бар} = 51,55 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.5. Розрідження в газоході котла вимірюється за допомогою тягоміра із похилою трубкою (рис. 1.2). Кут нахилу трубки $\phi=30^\circ$. Як вимірювальна рідина залити гас із густиною $0,8 \text{ г}/\text{см}^3$.

Визначити абсолютний тиск у газоході котла в барах, паскалях, в технічних атмосферах при відліку за похилою шкалою трубки приладу $\ell=220 \text{ мм}$ та барометричному тиску в котельні (наведеному до $0 \text{ }^\circ\text{C}$) $=740 \text{ мм рт.ст.}$

Відповідь: $p=0,978 \text{ бар} = 97800 \text{ Па} = 0,997 \text{ кгс}/\text{см}^2$.

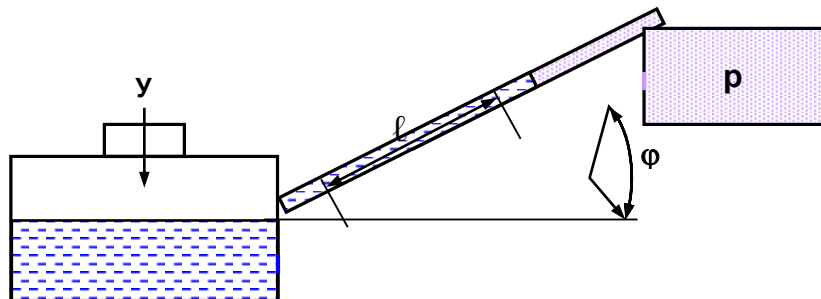


Рис. 1.2. Вимірювання розрідження тягоміром

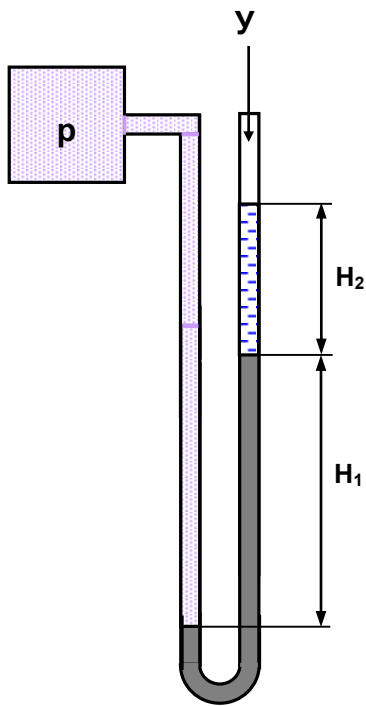


Рис. 1.3. Вимірювання тиску U-подібним манометром

1.6. Для визначення тиску газу до посудини підключено U-подібний ртутний манометр (рис.1.3). Висота стовпа ртуті $H_1=500$ мм. Над ртуттю у правому коліні знаходиться вода. Висота водяного стовпа $H_2=200$ мм. Барометричний тиск $B_0=742$ мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск газу в посудині в міліметрах ртутного стовпа та в барах.

Відповідь: $p = 1256,7$ мм. рт. ст. = 1,675 бар.

1.7. У конденсаторі парової турбіни підтримується абсолютний тиск $p=0,04$ бар. Якими будуть показання вакуумметрів, проградуєваних у кілопаскалях та міліметрах ртутного стовпа, якщо в одному випадку показання барометра (наведеного до 0 °C) становить 735 мм рт. ст., а в іншому - 764 мм рт.ст.?

Відповідь: 1) $p_v = 94,0$ кПа = 705 мм рт.ст.;

2) $p_v = 97,87$ кПа = 734 мм рт. ст.

1.8. Манометр, встановлений у відкритій кабіні літака, що знаходиться на землі, та вимірює тиск олії в двигуні, показує 6 кгс/см² при показаннях барометра 752 мм рт.ст.

1) Який абсолютний тиск олії, виражене в бар, кгс/см², мм рт.ст., мм вод. ст.?

2) Які будуть показання манометра в цих одиницях після підйому літака на деяку висоту, де атмосферний тиск становить 442,5 мм рт.ст., якщо абсолютний тиск масла в двигуні залишається незмінним? Прискорення вільного падіння вважати нормальним ($g=9,81$ м/с²), які залежать від висоти підйому літака. Густина ртуті та води прийняти відповідно при 0 та 4 °C $\rho_{Hg}=13595$ кг/м³, $\rho_{H_2O}=1000$ кг/м³.

Відповідь: 1) $p = 6,89$ бар = $7,0223$ кгс/см² = 5165 мм рт. ст. = $7,022 \cdot 10^4$ мм вод. ст.;

2) $p_m = 6,297$ бар = $6,421$ кгс / см² = 4723 мм рт. ст. = $6,421 \cdot 10^4$ мм вод. ст.

1.9. Визначити абсолютний тиск у повітропроводі (рис.1.4), якщо вимірювання тиску ведеться мікроманометром. Довжина трубки мікроманометра заповнена рідиною, $\ell = 180$ мм. Трубка нахилена під кутом $\alpha=30^\circ$, а робоча рідина-спирт із щільністю $0,8$ г/см³. Показ барометра $0,1020$ МПа. Тиск визначити в мегапаскалях, міліметрах ртутного стовпа та кгс/см².

Відповідь: $p = 0,1027 \text{ МПа} = 770 \text{ мм рт.ст.} = 1,047 \text{ кгс/см}^2$.

1.2. Контрольні питання

1. Що називають параметром стану?
2. Назвіть основні термічні параметри стану.

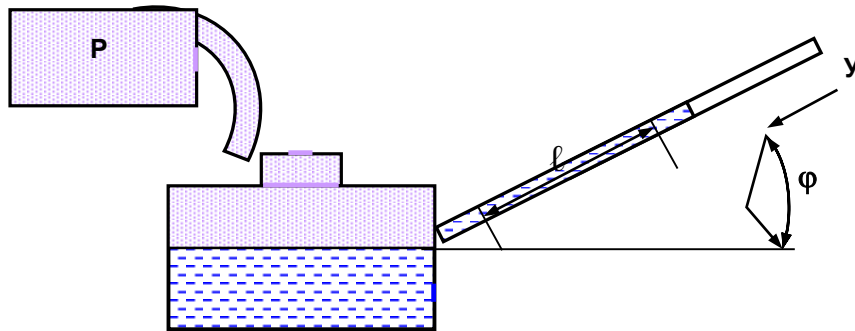


Рис. 1.4. Вимірювання тиску мікроманометром

3. Яку розмірність мають питомий об'єм та густина речовини в системі СІ?
4. Що розуміють під температурою газу в технічній термодинаміці?
5. Які температурні шкали використовуються в технічній термодинаміці і на чому вони засновані?
6. Що розуміється під тиском газу у технічній термодинаміці?
7. Чи є манометричний та вакуумметричний тиск параметрами стану?
8. Які термодинамічні властивості тіл та систем використовуються для вимірювання температур та різниць температур у різних термометричних приладах?

2. ЗАКОНИ І РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ. СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Стан ідеального газу визначається будь-якою парою термічних параметрів. Третій параметр може бути визначений з рівняння стану ідеального газу, що має вигляд

для одного кілограма газу

$$p v = R T, \quad (2.1)$$

де p - Абсолютний тиск газу, Па;

v – питомий обсяг газу, м³/кг;

$R = \frac{8314}{\mu}$ – газова постійна, Дж/(кг·К);

T - абсолютна температура, К;

для m кг газу, що займає об'єм V , м³,

$$p V = m R T, \quad (2.2)$$

для одного кіломолю газу

$$p V_{\mu} = R_{\mu} T, \quad (2.3)$$

де $R_{\mu} = 8314$ – універсальна газова стала, Дж/(кмоль·К);

μ - маса кіломолю газу, кг/кмоль

V_{μ} - об'єм кіломолю газу, м³/кмоль.

Для суміші ідеальних газів рівняння (2.2) має вигляд

$$p_{\text{см}} V_{\text{см}} = m_{\text{см}} R_{\text{см}} T_{\text{см}}, \quad (2.4)$$

де $p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i$ - тиск газової суміші, що дорівнює

сумі парціальних тисків газів, що входять до суміші (закон Дальтона);

$V_{\text{см}}$ - об'єм, який займає вся суміш газів;

$m_{\text{см}} = m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i$ - маса газової суміші, що дорівнює сумі мас

газів, що входять у суміш;

$T_{\text{см}}$ – температура суміші газів;

$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}}$ - газова постійна суміші газів, Дж/(кг·К).

Тут $\mu_{\text{см}}$ - маса умовного кіломолю суміші газів.

Склад газової суміші може бути заданий масовими чи об'ємними частками.

Масовою часткою g_i даного компонента газової суміші називається відношення його маси до маси всіх компонентів газів, що входять до суміші:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}} \quad (2.5)$$

Очевидно, що сума масових часток усіх газів, що становлять суміш, дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1$$

Об'ємною часткою r_i даного компонента газу називається відношення його парціального обсягу до обсягу всієї суміші газів:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} \quad (2.6)$$

де $V_i = m_i \frac{R_i T_{\text{см}}}{P_{\text{см}}}$ – парціальний об'єм даного газу (це умовний об'єм компонента газової суміші при $T_{\text{см}}$ та $P_{\text{см}}$), м³.

Записавши рівняння (2.4) через парціальний тиск і через парціальний об'єм:

$$p_i V_{\text{см}} = m_i R_i T_{\text{см}},$$

$$P_{\text{см}} V_i = m_i R_i T_{\text{см}},$$

можна отримати ще один вираз для визначення об'ємних часток компонентів газової суміші, поділивши праві та ліві частини цих рівнянь одне на інше:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = \frac{p_i}{P_{\text{см}}} \quad (2.7)$$

Оскільки сума парціальних тисків дорівнює тиску суміші, то сума об'ємних часток усіх газів суміші дорівнює одиниці, а сума парціальних обсягів дорівнює повному об'єму всієї суміші газів:

$$\sum_{i=1}^n r_i = 1 \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i = V_{\text{см}} \quad (2.9)$$

Існує взаємозв'язок масових та об'ємних часток суміші:

$$g_i = r_i \frac{\mu_i}{\mu_{\text{см}}} = r_i \frac{R_{\text{см}}}{R_i} \quad \text{або} \quad r_i = g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} = g_i \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_i} \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) дозволяє отримати розрахункові вирази для умовної молярної маси та постійної газової суміші газів

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i, \quad (2.11)$$

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i. \quad (2.12)$$

При відомій молярній масі суміші газів постійну суміші простіше визначити із співвідношення

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}}.$$

2.1. Задачі

Рівняння стану ідеального газу

Приклад розв'язання задачі:

2.1. У балоні місткістю 0,9 м³ знаходиться кисень за температури 17 °С. Приєднаний до балона вакуумметр вказує 600 мм вод. ст. Барометричний тиск $B_o=740$ мм рт.ст.

Визначити масу газу у балоні.

Рішення

Абсолютний тиск газу в балоні визначається виразом

$$p = B_o - p_v = B_o - \rho_{\text{H}_2\text{O}} g H.$$

Наводимо заданий тиск до розмірності в СІ (Па), використовуючи співвідношення 1 бар=750 мм рт. ст., щільність води $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=1000$ кг/м³ і розраховуємо абсолютний тиск газу в балоні:

$$p = \frac{740}{750} 10^5 - 1000 \cdot 9,81 \cdot 600 \cdot 10^{-3} = 92784 \text{ Па.}$$

Визначаємо газову постійну кисню:

$$R_{\text{O}_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{32} = 260 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Розраховуємо масу газу в балоні за рівнянням стану ідеального газу:

$$m = \frac{pV}{R_{\text{O}_2} T} = \frac{92784 \cdot 0,9}{260 \cdot (17 + 273,15)} = 1,1 \text{ кг.}$$

Відповідь: $m=1,1$ кг.

- 2.2. Визначити об'єм 1 кіломолю ідеального газу за нормальних фізичних умов. Нормальні фізичні умови: $p=760$ мм рт.ст., $t=0$ °С.
Відповідь: $V_{\mu}= 22,4$ м³/кмоль.
- 2.3. Визначити питомий обсяг ідеального газу кисню O₂ ($\mu=32$ кг/кмоль) при тиску 1 бар та температурі 20 °С.
Відповідь: $v = 0,762$ м³/кг.
- 2.4. За нормальних фізичних умов ідеальний газ має об'єм 5 м³. Який обсяг займе газ при тиску 5 бар та температурі 265 °С?
Нормальні фізичні умови: $p=760$ мм рт.ст., $t=0$ °С.
Відповідь: $V = 2$ м³.
- 2.5. Абсолютний тиск азоту (N₂) у твердій посудині при кімнатній температурі $t=20$ °С становить $p=2,2$ МПа. У посудині азот нагрівається, причому відомо, що граничний надлишковий тиск, при якому можлива безпечна робота судини, $p_{\text{надл}} = 6$ МПа. Визначити граничну допустиму температуру нагрівання газу в посудині. Газ вважати ідеальним, а атмосферний тиск $B=0,1$ МПа.
Відповідь: $t=539$ °С.
- 2.6. Початковий стан азоту (N₂) задано параметрами: $t=200$ °С, $v=1,9$ м³/кг. Азот нагрівається при постійному тиску, причому питомий обсяг його збільшується втричі. Визначити кінцеву температуру азоту, вважаючи його ідеальним газом.
Відповідь: $t=1146$ °С.
- 2.7. У твердий резервуар місткістю 3 м³ компресором нагнітається азот(N₂), надлишковий тиск у резервуарі підвищується від 0,2 до 2,5 бар, а температура від 25 до 75°С. Барометричний тиск $B_0=750$ мм рт.ст. Визначити масу азоту, що надійшов у резервуар. Вважати азот ідеальним газом.
Відповідь: $\Delta m=6,1$ кг.
- 2.8. У циліндрі з рухомим поршнем при розрідженні (вакуумі), рівному 42,7 кПа. Барометричний тиск становить 745 мм рт. ст. При постійній температурі кисень стискається до надлишкового тиску $p_m = 1,2$ МПа. У скільки разів зміниться обсяг кисню?
Відповідь: $V_1/V_2 = 22,9$.
- 2.9. Дирижабль з м'якою оболонкою, наповненою воднем, при атмосферному тиску = 600 мм рт.ст. і $t=2$ °С повинен мати підйомну силу, що забезпечує його горизонтальний політ, при загальній масі вантажу 5000 кг (включаючи масу дирижаблевої оболонки без водню). Визначити обсяг оболонки дирижабля, рахуючи повітря ($\mu=28,96$ кг/кмоль) та водень ідеальними газами.
Відповідь: $V = 5300$ м³.

Приклад розв'язання задачі:

2.10. До складу газової суміші входять: 3 кг азоту (N_2), 5 кг кисню (O_2) та 2 кг двоокису вуглецю (CO_2). Вважаючи всі гази ідеальними, визначити який обсяг займе газова суміш при тиску 2 бар і температурі 127 °С.

Рішення

Визначаються маса всієї газової суміші $m_{см} = 3 + 5 + 2 = 10$ кг та масові частки компонентів суміші: $g_{N_2} = 0,3$; $g_{O_2} = 0,5$; $g_{CO_2} = 0,2$.

Розраховується постійна газова суміші:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} g_i R_i = 0,3 \frac{8314}{28} + 0,5 \frac{8314}{32} + 0,2 \frac{8314}{44} = 256,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Об'єм, займаний газовою сумішшю,

$$V_{см} = \frac{m_{см} R_{см} T_{см}}{p_{см}} = \frac{10 \cdot 256,8 \cdot (273,15 + 127)}{2 \cdot 10^5} = 5,1 \text{ м}^3.$$

2.11. У посудині об'ємом 3 м³ міститься суміш ідеальних газів при тиску 3 бар і температурі 27 °С. $r_{CO_2} = 13\%$, $r_{O_2} = 7\%$, $r_{N_2} = 80\%$.

Визначити масу газової суміші у посудині.

Відповідь: $m_{см} = 10,95$ кг.

2.12. Суміш ідеальних газів водню (H_2) і метану (CH_4) має постійну газову, рівну 2520 Дж/(кг·К). Визначити склад газової суміші за масою та обсягом.

Відповідь: $r_{H_2} = 0,907$, $r_{CH_4} = 0,093$, $g_{H_2} = 0,55$, $g_{CH_4} = 0,45$.

2.13. Для суміші повітря ($\mu_B = 28,96$ кг/кмоль) та світільного газу ($\mu_{сг} = 11,6$ кг/кмоль) задана масова частка повітря $g_B = 6/7$. Вважаючи гази ідеальними, визначити: $R_{см}$, $\mu_{см}$, щільність суміші $\rho_{см}$ при $t_{см} = 17$ °С і $p_{см} = 1,2$ бар і об'ємні частки газів, що входять до суміші r_i .

Відповідь: $R_{см} = 348$ Дж/(кг·К), $\mu_{см} = 23,9$ кг/кмоль, $\rho_{см} = 1,2$ кг/м³,
 $r_B = 0,706$, $r_{сг} = 0,294$.

2.14. 4 кг газової суміші, що складається з азоту (N_2), світільного газу ($\mu = 11,65$ кг/кмоль) та двоокису вуглецю (CO_2) при температурі 20 °С займають об'єм $V = 8$ м³. Парціальні обсяги газів, що входять до суміші, відносяться між собою як $V_{N_2} : V_{сг} : V_{CO_2} = 5 : 1 : 2$. Вважаючи гази ідеальними, визначити $R_{см}$, $p_{см}$ і парціальний тиск газів, що входять в суміш, p_i .

Відповідь: $R_{см} = 277$ Дж/(кг·К), $p_{см} = 0,405$ бар, $p_{N_2} = 0,253$ бар,

$p_{сг} = 0,0508$ бар, $p_{CO_2} = 0,1012$ бар.

2.15. Газова суміш складається з азоту (N_2) та двоокису вуглецю (CO_2). При температурі $27\text{ }^\circ\text{C}$ і манометричному тиску 2 бари 4 кг суміші займають об'єм $0,96\text{ м}^3$. Ртутний барометр при $27\text{ }^\circ\text{C}$ показує тиск атмосферного повітря 730 мм. Вважаючи гази ідеальними, визначити: $R_{см}$, $\mu_{см}$ і парціальний тиск газів, що входять в суміш, p_{N_2} , p_{CO_2} .

Відповідь: $R_{см}=237\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $\mu_{см}=35\text{ кг}/\text{кмоль}$,
 $p_{N_2}=1,67\text{ бар}$, $p_{CO_2}=1,33\text{ бар}$.

2.2. Контрольні питання

1. Дайте визначення ідеального газу та вкажіть його відмінності від реального газу.
2. Чим відрізняється газова постійна від універсальної газової постійної?
3. Що називають парціальним тиском газу в суміші, чи існує воно фізично і як визначається?
4. Що називають парціальним обсягом газу в суміші, чи існує воно фізично і як визначається?
5. Як визначити об'ємну частку газу в суміші, якщо відома його масова частка?

3. ТЕПЛОЄМКОСТІ ГАЗІВ І ГАЗОВИХ СУМІШІВ

Теплоємністю називають кількість теплоти, яку необхідно передати тілу, щоби підвищити температуру його певної кількості на 1 градус.

Теплоємність, віднесена до певної кількості речовини, називають питомою теплоємністю.

Розрізняють такі питомі теплоємності:

$$\text{масову, кДж/(кг}\cdot\text{К)}, \quad c = \frac{\delta Q}{m dt} = \frac{\delta q}{dt} \quad ;$$

$$\text{об'ємну, кДж/(м}^3\cdot\text{К)}, \quad c' = \frac{\delta Q}{V dt} \quad ;$$

$$\text{мольну, кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}, \quad \mu c = \mu \cdot c.$$

Питома теплоємність пов'язана співвідношеннями

$$c = v \cdot c' = \frac{\mu c}{\mu}, \quad c' = \frac{c}{v} = \frac{\mu c}{V_{\mu}}, \quad \mu c = \mu \cdot c = V_{\mu} \cdot c'. \quad (3.1)$$

У довідковій літературі прийнято давати об'ємну теплоємність газу, віднесена до одного кубічного метра газу, взятого за нормальних фізичних умов, кДж/(н.м³·К), що для ідеального газу відповідає виразу

$$c'_H = \frac{\mu c}{22,4}. \quad (3.2)$$

Оскільки теплота є функцією процесу, то теплоємність є функція процесу. Насправді найбільше застосування знайшли теплоємності ізобарного c_p при $p=\text{const}$ і ізохорного c_v при $v=\text{const}$ процесів.

Для класичної моделі ідеального газу ізохорна та ізобарні теплоємності – постійні величини, що визначаються як

$$c_v = \frac{R}{2} i, \quad (3.3)$$

$$c_p = \frac{R}{2} (i + 2), \quad (3.3)$$

де i – число ступенів свободи цього газу (рис. 3.1).

Ізобарна та ізохорна теплоємності ідеальних газів взаємопов'язані через формулу Майєра:

$$c_p = c_v + R, \quad \text{або} \quad \mu c_p = \mu c_v + R_{\mu}. \quad (3.3)$$

У розрахунках газових процесів часто використовують коефіцієнт Пуассона, який для однорідних ідеальних газів визначається числом ступенів свободи його молекул.

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{i + 2}{i} \quad (3.4)$$

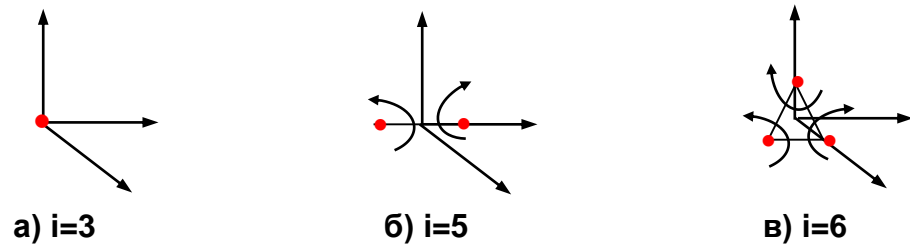


Рис. 3.1. До визначення числа ступенів свободи ідеальних газів: а – одноатомний; б – двоатомний; в – три- та багатоатомні газу

Теплоємності реальних газів

Теплоємності реальних газів залежать від температури та тиску газу. Більшою мірою проявляється вплив температури на теплоємність.

Відповідно до цього було введено поняття справжньої та середньої теплоємностей газу.

Справжня теплоємність газу відповідає розрахунковому виразу

$$c_{t_1} = \left(\frac{\delta q}{dt} \right)_{\lim \Delta t \rightarrow 0} \quad (3.5)$$

Експериментальна залежність істинної теплоємності процесу реального газу від температури зазвичай представляється у вигляді ступеневого полінома або табличного чисельного матеріалу:

$$c = a + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + \dots + b_n t^n \quad (3.6)$$

Розрахунок теплоти за допомогою справжньої теплоємності виконується шляхом інтегрування:

$$q_{12} = \int_{t_1}^{t_2} c dt \quad (3.7)$$

Середня теплоємність газу відповідає розрахунковому виразу

$$c_{m|t_1}^{t_2} = \frac{q_{12}}{t_2 - t_1} \quad (3.8)$$

Вона визначається як відношення теплоти процесу, що йде в інтервалі температур t_1 і t_2 , до різниці цих температур.

Середню теплоємність можна використовувати лише на даному інтервалі температур процесу.

У довідкових таблицях властивостей газів наводяться значення середніх теплоємностей в інтервалі від 0 до t °С, що дозволяє розрахунковим шляхом

отримати середню теплоємність для будь-якого інтервалу температур t_1 і t_2 :

$$c_{m|t_1}^{t_2} = \frac{c_{m|0}^{t_2} \cdot t_2 - c_{m|0}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (3.9)$$

Теплоємності сумішей газів визначаються з використанням їх масових або об'ємних часток:

питома масова теплоємність суміші газів

$$c_{cm} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n = \sum_{i=1}^n g_i c_i \quad (3.10)$$

питома об'ємна теплоємність суміші газів

$$c'_{cm} = r_1 c'_1 + r_2 c'_2 + \dots + r_n c'_n = \sum_{i=1}^n r_i c'_i \quad (3.11)$$

питома мольна теплоємність суміші газів

$$\mu c_{cm} = r_1 \mu c_1 + r_2 \mu c_2 + \dots + r_n \mu c_n = \sum_{i=1}^n r_i \mu c_i \quad (3.12)$$

Коефіцієнт Пуассона для суміші газів визначається як

$$K_{cm} = \frac{c_{p_{cm}}}{c_{v_{cm}}} = \frac{\mu c_{p_{cm}}}{\mu c_{v_{cm}}} \quad (3.13)$$

3.1. Задачі

Теплоємності ідеальних газів

Приклад розв'язання задачі:

3.1. Визначити питомі масові, мольні, об'ємні (на нормальний m^3) ізохорні та ізобарні теплоємності кисню O_2 ($\mu=32$ кг/кмоль), вважаючи його ідеальним газом із “жорсткими” молекулами.

Рішення

Питомі мольні ізохорна та ізобарна теплоємності ідеального кисню

$$\mu c_v = \frac{R_\mu}{2} i = \frac{8314}{2} \cdot 5 = 20785 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} ;$$

$$\mu c_p = \frac{R_\mu}{2} (i + 2) = \mu c_v + R_\mu = 20785 + 8314 = 29099 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} .$$

Питомі масові ізохорну та ізобарну теплоємності кисню можна визначити через відповідні мольні теплоємності:

$$c_v = \frac{\mu c_{v,m}}{\mu} = \frac{20785}{32} = 649,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} ;$$

$$c_p = \frac{\mu c_{p,m}}{\mu} = \frac{29099}{32} = 909,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} .$$

Питомі об'ємні (на нормальний н.м³) ізохорну та ізобарну теплоємності кисню можна також визначити через відповідні мольні теплоємності:

$$c'_{v} = \frac{\mu c_{v,m}}{V_{\mu}^{\text{н.у.}}} = \frac{20785}{22,4} = 927,9 \frac{\text{Дж}}{\text{н. м}^3 \cdot \text{К}} ;$$

$$c'_{p} = \frac{\mu c_{p,m}}{V_{\mu}^{\text{н.у.}}} = \frac{29099}{22,4} = 1299 \frac{\text{Дж}}{\text{н. м}^3 \cdot \text{К}} .$$

3.2. Повітря, що займає об'єм $V_1=15$ м³ при температурі $t_1=1500$ °С та тиск $p_1=760$ мм рт.ст., ізохорно охолоджується до $t_2=250$ °С. Визначити відведену від повітря теплоту Q , вважаючи його теплоємність постійною, як у ідеального двоатомного газу з молярною масою $\mu=28,96$ кг/кмоль.

Відповідь: $Q = -2,68$ МДж.

Теплоємності реальних газів

3.3. Справжня мольна ізобарна теплоємність газу з $\mu=38$ кг/кмоль визначається залежністю

$$\mu c_p = 30 + 0,0025 \cdot t + 0,000001 \cdot t^2, \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

У ізохорному процесі 6 кг цього газу нагріваються від 80 до 700 °С. Визначити теплоту цього процесу.

Відповідь: $Q = 2236$ кДж.

3.4. Середня масова ізобарна теплоємність газу з $\mu=30$ кг/кмоль на інтервалі температур від 0 до 50 °С має значення $C_{p,m}|_0^{50} = 0,8$ кДж/(кг·К), а на інтервалі від 0 до 100 °С має значення $C_{p,m}|_0^{100} = 0,86$ кДж/(кг·К). Визначити середню масову та мольну ізобарну теплоємності газу на інтервалі температур від 50 °С до 100 °С.
Відповідь: $c_{p,m}=0,92$ кДж/(кг·К), $\mu c_{p,m}=27,6$ кДж/(кмоль·К).

3.5. Повітря ($\mu=28,96$ кг/кмоль) з температурою 150 °С утворюється в результаті ізобарного змішування двох потоків повітря: холодного з $t_1 = 15$ °С і гарячого з $t_2 = 900$ °С. Визначити, скільки холодного та гарячого повітря утворює 1 кг суміші. Усі тиску вважати однаковими. Середня мольна ізобарна теплоємність повітря, взята від 0 °С, визначається за формулою

$$\mu c_{pm} = 29,1 + 0,002415 \cdot t, \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Відповідь: $m_1 = 0,855 \text{ кг}$, $m_2 = 0,145 \text{ кг}$.

3.6. Повітря ($\mu = 28,96 \text{ кг}/\text{кмоль}$), що має температуру $t_1 = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$, тиск $P = 760 \text{ мм рт.ст.}$ і займає об'єм $V_1 = 5 \text{ м}^3$, ізобарно охолоджується до $t_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити кількість теплоти, що відводиться від повітря, якщо:

- 1) вважати теплоємність постійною як для ідеального двоатомного газу;
- 2) вважати справжню теплоємність повітря, що підпорядковується залежності $\mu c_p = 29,1 + 0,002415 \cdot t \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

Визначити відносну різницю результатів за першим та другим методами розрахунку.

Відповідь: $Q_1 = -1250 \text{ кДж}$, $Q_2 = -1340 \text{ кДж}$, $\delta Q = 9,1\%$.

3.7. 4 м^3 вуглекислого газу (CO_2) знаходяться при $p_1 = 7 \text{ бар}$ та $t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити кількість теплоти, яку потрібно при постійному тиску підвести до газу, щоб нагріти його до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Значення теплоємностей газу брати з таблиць середніх теплоємностей (табл. П2.2).

Відповідь: $Q = 16 \text{ МДж}$.

3.8. Справжня мольна ізобарна теплоємність газу, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$, з молярною масою $\mu = 28 \text{ кг}/\text{кмоль}$ визначається за формулою

$$\mu c_p = 30 + 0,008 \cdot t + 0,000002 \cdot t^2$$

Визначити зміну внутрішньої енергії 1 кг газу при зміні температури від $200 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Відповідь: $\Delta u = 781 \text{ кДж}/\text{кг}$.

3.9. Справжня мольна ізобарна теплоємність газу, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$, з молярною масою $\mu = 30 \text{ кг}/\text{кмоль}$ визначається виразом

$$\mu c_p = 30 + 0,008 \cdot t + 0,000002 \cdot t^2$$

Визначити середню масову ізобарну теплоємність цього газу на інтервалі температур від $300 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Відповідь: $c_{pm} = 1,242 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

3.10. Середня мольна ізобарна теплоємність газу, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$, прийнята від $0 \text{ }^\circ\text{C}$, визначається за формулою

$$\mu c_p = 29 + 0,001 \cdot t + 0,00001 \cdot t^2$$

Визначити теплоту ізохорного процесу при нагріванні 1 кг газу від $200 \text{ }^\circ\text{C}$ до $800 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо його молярна маса $\mu = 32 \text{ кг}/\text{кмоль}$.

Відповідь: $q_v = 564 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Теплоємності суміші газів

3.11. Визначити масові ізохорну та ізобарну теплоємності суміші ідеальних газів, якщо заданий об'ємний склад суміші: 10 % водню (H_2), 10 % окису вуглецю (CO), 40 % вуглекислого газу (CO_2), 40 % азоту (N_2).

Відповідь: $c_v=0,706$ кДж/(кг·К); $c_p=0,967$ кДж/(кг·К).

3.12. Користуючись таблицями середніх теплоємностей, визначити середню об'ємну теплоємність (на нормальний m^3) за постійного тиску для суміші газів, за зміни температури від 200 до 1200 °С. Об'ємний склад суміші: 14,5% вуглекислого газу; 6,5% кисню, 79% азоту.

Відповідь: $c_p'=1,58$ кДж/(н.м³·К).

3.13. Суміш водню та метану, що містить за обсягом 40 % водню, нагрівається при постійному тиску від 20 до 350 °С. Визначити витрату теплоти на 1 кг суміші, якщо рахувати:

1) теплоємність постійної як для ідеальних газів з жорсткими молекулами;

2) теплоємність змінної (використовувати табл. П2.2 середніх теплоємностей).

Оцінити відносну похибку результатів розрахунку першого методу стосовно другого.

Відповідь: $q_1=1003$ кДж/кг, $q_2=1208$ кДж/кг, $\delta q = \frac{q_2 - q_1}{q_2} 100 = 17\%$.

3.14. Об'ємний склад газової суміші заданий: 80% N_2 , 16% O_2 , 4% CO_2 . Визначити питомі ізобарні теплоємності суміші цих газів: мольну, масову, об'ємну (з розрахунку на нормальний кубічний метр). Розрахунки виконати двома способами:

а) вважаючи гази ідеальними з постійними теплоємностями, які не залежать від температури,

б) визначити середні теплоємності суміші в інтервалі температур 400 °С – 1000 °С, використовуючи таблиці середніх теплоємностей (табл. П2.2) та оцінити відносну похибку порівняно з попередніми розрахунками.

Відповідь:

а) $\mu_{ср см} = 29,265$ кДж/(кмоль·К), $c_{р см} = 0,9995$ кДж/(кг·К),

$c'_{р см} = 1,306$ кДж/(н.м³·К);

б) $\mu_{ср см} = 33,691$ кДж/(кмоль·К), $c_{р см} = 1,151$ кДж/(кг·К),

$c'_{р см} = 1,504$ кДж/(н.м³·К);

$\delta c_{р см} = 13,13\%$.

3.2. Контрольні питання

1. Які є види питомих теплоємностей та як вони взаємопов'язані?

2. Для яких процесів наводяться теплоємності у довідниках та чому?

3. Від яких характеристик ідеальних газів залежать чисельні значення їх питомих мольних ізобарних та ізохорних теплоємностей?

4. Від яких характеристик ідеальних газів залежать чисельні значення їх питомих масових ізобарних та ізохорних теплоємностей?
5. Сформулюйте визначення дійсної теплоємності.
6. Сформулюйте визначення середньої теплоємності.
7. Чому середні теплоємності газів у довідниках даються від 0°C ?
8. Як розраховуються питомі теплоємності газових сумішей?

4. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ЗАКРИТОЇ СИСТЕМИ

Перший закон термодинаміки – це закон збереження енергії для термодинамічної системи. Відповідно до цього закону в закритій нерухомій термодинамічній системі зміна її внутрішньої енергії дорівнює сумі зовнішніх теплових та механічних робіт. мати вигляд

$$U_2 - U_1 = Q - L' , \quad (4.1)$$

де $U_2 - U_1$ – зміна внутрішньої енергії тіла (системи), Дж;

Q – кількість теплоти, одержана тілом (системою), Дж;

L' - робота зміни обсягу, що здійснюється тілом, Дж.

Для одного кілограма речовини вираз (4.1) має вигляд

$$q = u_2 - u_1 + \ell' . \quad (4.2)$$

Диференціальна форма запису першого закону термодинаміки має вигляд

$$\delta Q = dU + \delta L' , \quad (4.3)$$

$$\delta q = du + \delta \ell' . \quad (4.4)$$

У цих рівняннях величинами L' і ℓ' позначається робота зміни обсягу, що здійснюється тілом у реальних незворотних процесах.

Розрахунковий вираз питомої роботи зміни обсягу оборотного процесу відповідає виразу

$$\delta \ell = p dv . \quad (4.5)$$

Робота незворотного процесу ℓ' менше роботи зміни обсягу оборотного процесу на величину роботи тертя:

$$\delta \ell' = \delta \ell - \delta \ell_{\text{тр}} = p dv - \delta \ell_{\text{тр}} . \quad (4.6)$$

У оборотних процесах $\delta \ell_{\text{тр}}=0$, і перший закон термодинаміки для оборотних процесів матиме вигляд

$$\delta q = du + \delta \ell . \quad (4.7)$$

Виразивши внутрішню енергію через ентальпію ($u=h-pv$) і підставивши в рівняння (4.7), отримаємо

$$\delta q = dh - v dp . \quad (4.8)$$

Рівняння першого закону термодинаміки (4.7) та (4.8) найбільш потрібні при розрахунках процесів у замкнутих системах.

4.1. Задачі

Приклад розв'язання задачі:

4.1. Газу передається 400 кДж теплоти, при цьому газ стискається. Робота зміни обсягу становить 300 кДж. Визначити зміну внутрішньої енергії газу.

Рішення

Відповідно до правила знаків у термодинаміці прийнято вважати $Q > 0$ якщо до газу підводиться теплота, і $L < 0$ якщо над газом здійснюється робота (газ стискається).

Таким чином, за умовою задачі $Q = 400$ кДж і $L = -300$ кДж. Відповідно до першого закону термодинаміки отримуємо величину зміни внутрішньої енергії газу

$$U_2 - U_1 = Q - L = 400 - (-300) = 700 \text{ кДж.}$$

4.2. На стиск 1 кг газу витрачено 500 кДж роботи, у своїй внутрішній енергії газу збільшується на 350 кДж. Визначити, підводиться чи відводиться теплота до газу та її кількість.

Відповідь: $Q = -150$ кДж.

4.3. Потужність турбогенератора 200 МВт, яке ККД становить 99 %. Охолодження генератора проводиться воднем з теплоємністю $C_p = 14,3$ кДж/(кг·К). Вважаючи, що вся теплота втрат відводиться воднем, що ізобарно нагрівається при проходженні через генератор на 30°C , Визначити його секундний масовий витрата.

Відповідь: $G = 4,7$ кг/с.

4.4. Яку мінімальну кількість охолоджуючої води при $p = \text{const}$ слід подавати на колодки гальма, якщо потужність двигуна 55 кВт, а 20% теплоти тертя розсіюється в навколишньому середовищі, а гранично допустима температура води на виході 80°C води $c_p = 4,187$ кДж/(кг·°C) прийняти постійною.

Відповідь: $G = 0,15$ кг/с.

4.2. Контрольні питання

1. Для якої термодинамічної системи записано рівняння $\delta q = du + \delta l$?
2. Які види енергетичної взаємодії тіл розглядаються у технічній термодинаміці?
3. У чому полягає сутність принципу еквівалентності теплоти та роботи?
4. У яких випадках вважається теплота величиною позитивною?

5. У яких випадках вважається робота зміни обсягу позитивною величиною?
6. Яка принципова відмінність між поняттями «внутрішня теплова енергія» та «теплота»?
7. Яка принципова різниця між рівняннями $f(p, v, T)=0$ та $\delta q = du + \delta l$?
8. Для яких процесів доцільно використовувати перший закон термодинаміки як рівняння $\delta q = dh - vdp$?
9. Скільки диференціальних рівнянь першого закону термодинаміки можна записати?

5. ПОЛІТРОПНІ ПРОЦЕСИ ЗМІНИ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

У перекладі слово «політропа» означає різноманіття процесів, а технічній термодинаміці політропними процесами називаються закономірні газові процеси. За величину, що визначає закономірність енергетичної взаємодії у газовому процесі, приймають відношення зміни внутрішньої енергії газу до кількості підведеної до нього теплоти:

$$\alpha = \frac{du}{\delta q} \quad (5.1)$$

Якщо $\alpha = \text{const}$, то процес буде політропним.

Для ідеальних газів з постійними ізобарними та ізохорними теплоємностями закономірність процесів можуть характеризувати такі величини:

$$\alpha = \frac{du}{\delta q} = \frac{c_v dT}{c dT} = \frac{c_v}{c} = \text{const} \quad \text{або} \quad c = \frac{c_v}{\alpha} = \text{const} \quad (5.2)$$

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \text{const} \quad \text{або} \quad c = c_v \frac{n - k}{n - 1} \quad (5.3)$$

де n - Показник політропи;

c – теплоємність процесу.

Рівняння політропи, що описують взаємозв'язок параметрів p, v, T, v і p, T , мають вигляд

$$pv^n = \text{const} \quad ; \quad (5.4)$$

$$Tv^{n-1} = \text{const} \quad ; \quad (5.5)$$

$$Tp^{\frac{1-n}{n}} = \text{const} \quad . \quad (5.6)$$

Використовуючи рівняння (5.4)÷(5.6), за двома станами газу в політропному процесі, можна визначити показник політропи, наприклад, за рівнянням (5.4):

$$n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{v_1}{v_2}} \quad (5.7)$$

Розрахунок оборотних політропних процесів ідеальних газів виконується на підставі рівняння першого закону термодинаміки та формул (5.2)÷(5.6). Основні розрахункові залежності для політропних процесів ідеальних газів наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Рівняння для розрахунку політропних процесів ідеальних газів

| Процеси | n | c | α | Рівняння | q | ℓ | Δs | $\Delta u, u, \Delta h$ |
|--|---------------------------|-----------------------|-------------------|---|--|---|--|---|
| p=const | 0 | c_p | $\frac{1}{k}$ | $\frac{v}{T} = \text{const}$ | $c_p \Delta t$ | $p \Delta v = R \Delta T$ | $c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$ | $\Delta u = c_v(t_2 - t_1), \square h = c_p(t_2 - t_1)$ |
| v=const | $\pm \infty$ | c_v | 1 | $\frac{p}{T} = \text{const}$ | $c_v \Delta t$ | 0 | $c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$ | |
| T=const | 1 | $\pm \infty$ | 0 | $pv = \text{const}$ | $RT \ln \frac{p_1}{p_2} =$ $= RT \ln \frac{v_2}{v_1}$ | $RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} =$ $= RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$ | $R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} =$ $= R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$ | |
| s=const ($\delta q = 0$) | до | 0 | $\pm \infty$ | $T p^{\frac{1-k}{k}} = \text{const}$ $pv^k = \text{const}$ $T v^{k-1} = \text{const}$ | 0 | $u_1 - u_2 =$ $= c_v(T_1 - T_2) =$ $= \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$ | 0 | |
| Політропа n=const, $\alpha = \text{const}$ | $\frac{c_p - c}{c_v - c}$ | $c_v \frac{n-k}{n-1}$ | $\frac{1-n}{k-n}$ | $T p^{\frac{1-n}{n}} = \text{const}$ $pv^n = \text{const}$ $T v^{n-1} = \text{const}$ | $c \Delta t$ | $\frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) =$ $= \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$ | $c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$ | |

На рис. 5.1 та 5.2 показані основні політропні процеси ідеальних газів у p,v- та T,s-діаграмах, що проходять через загальну точку А, що дозволяє наочно зіставити зображення політроп з різними значеннями показника політропи n.

Усі політропи в p,v-діаграмі з позитивним показником $n > 0$ розташовуються у II і IV квадрантах щодо точки А, а з показником $n < 0$ - в I та III квадрантах щодо точки А.

Політропи в T,s-діаграмі, що проходять через I і III квадранти, щодо точки А мають позитивну теплоємність, причому ізохора крутіше ізобари, т.к. $c_p > c_v$. Найкрутіша політропа - адіабата, для неї теплоємність дорівнює нулю. Найпологіша політропа - ізотерма, для неї теплоємність дорівнює нескінченності.

Політропи, що проходять у T,s-діаграмі через II і IV квадранти, мають негативну теплоємність, для них $1 < n < k$. У таких процесах підведення теплоти температура газу зменшується, а при відводі теплоти від газу його температура збільшується.

Використовуючи графічне зображення процесу проводять його якісний аналіз. Наприклад, за зображенням процесу АВ (рис. 5.2) видно, що це процес з негативною теплоємністю < 0 , так як dT та ds мають протилежні знаки; теплота процесу $q_{AB} > 0$, так як $ds > 0$; $\Delta u < 0$ і $\Delta h < 0$, так як $dT < 0$; робота зміни обсягу $\ell > 0$, так як при $1 < n < k$ ($c < 0$) і $T_B < T_A$ з рівняння політропи $T v^{n-1} = \text{const}$ слід, що $v_B > v_A$.

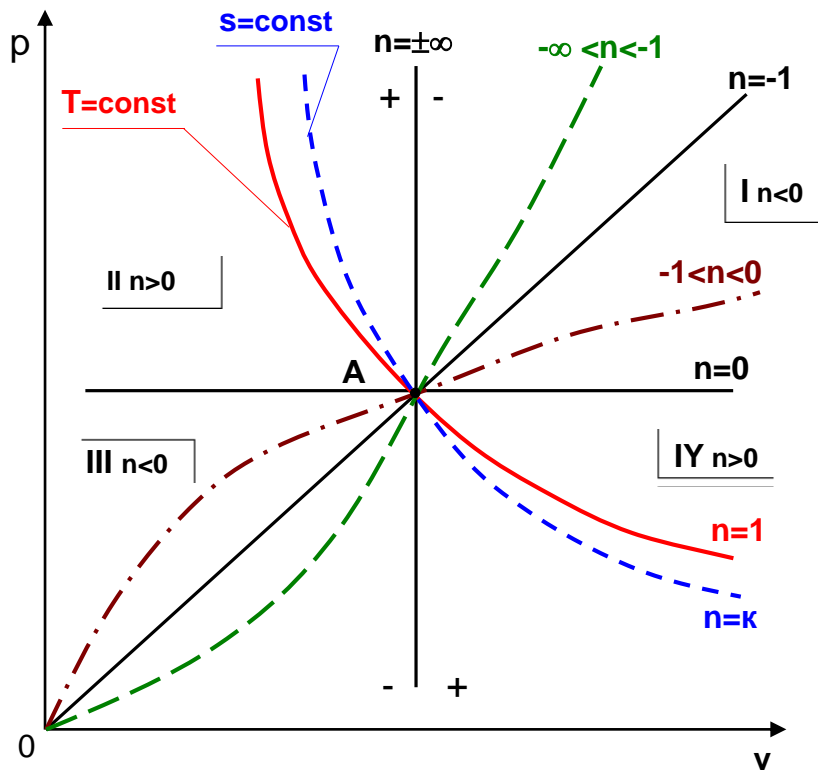


Рис. 5.1. Зображення політропних процесів ідеальних газів у p, v -діаграмі

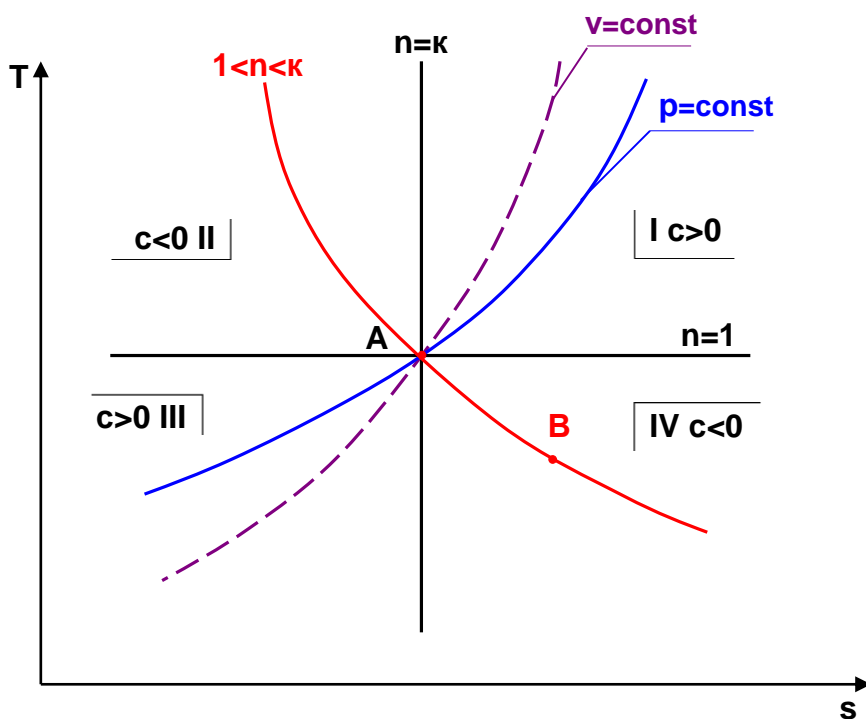


Рис. 5.2. Зображення політропних процесів ідеальних газів у T, s -діаграмі

5.1. Задачі

Приклад розв'язання задачі:

5.1. Двоокис вуглецю (CO_2) при тиску $p_1=0,2$ МПа та температурі $t_1=37$ °С по політропі з $n=2$ переходить у стан із тиском $p_2=0,8$ МПа. Визначити температуру та питому ентропію газу в кінці процесу, питому роботу зміни обсягу та теплоту процесу. Зобразити процес у діаграмах p, v та T, s .

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Рішення

Температура газу наприкінці процесу визначається з рівняння

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-n}{n}} = 310 \left(\frac{0,2}{0,8} \right)^{\frac{1-2}{2}} = 620 \text{ К.}$$

Абсолютне значення питомої ентропії s_2 визначають, прийнявши початок відліку $s_0=0$ при $p_0=p_1=0,2$ МПа та $t_0=t_1=37$ °С, за рівнянням

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_0} = \frac{8314}{2 \cdot 44} \cdot 8 \cdot \ln \frac{620}{310} - \frac{8314}{44} \cdot \ln \frac{0,8}{0,2} = 262 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Питому теплоту процесу визначають, використовуючи теплоємність процесу:

$$c = c_v \frac{n - k}{n - 1} = \frac{8314}{2 \cdot 44} \cdot 6 \frac{2 - 1,333}{2 - 1} = 378 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$q = c(T_2 - T_1) = 378(620 - 310) = 117180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Визначивши теплоємність процесу, перевіряють абсолютне значення питомої ентропії наприкінці процесу, поставивши початок відліку ентропії у першій точці процесу $s_0=s_1=0$ за рівнянням

$$s_2 = s_2 - s_0 = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 378 \cdot \ln \frac{620}{310} = 262 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Питому роботу зміни обсягу простіше визначити з першого закону термодинаміки:

$$\ell = q - \Delta u = q - c_v(T_2 - T_1) = 117180 - \frac{8314}{2 \cdot 44} \cdot 6(620 - 310) = -58548 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Перевірку визначення роботи зміни обсягу можна зробити за рівнянням

$$\ell = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{8314}{44(2-1)}(310 - 620) = -58576 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

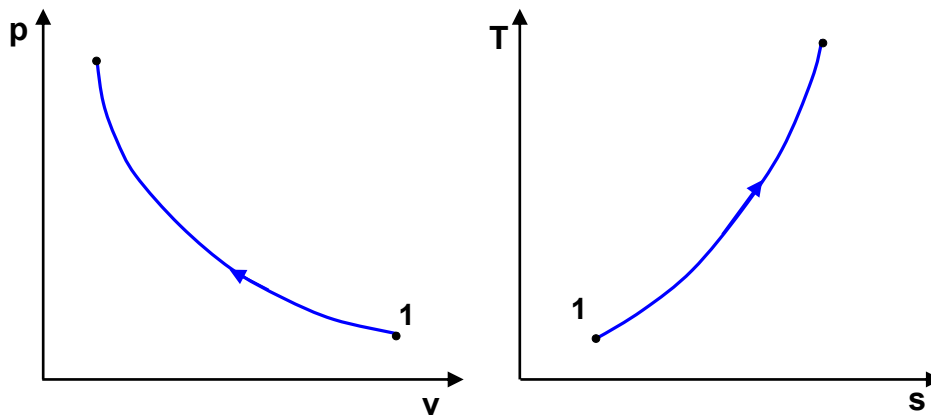


Рис. 5.3. Зображення процесу 12 до задачі 5.1 в p,v - і T,s -діаграмах

Процес з $n=2$ у діаграмі p,v – гіпербола, що йде у бік збільшення тиску, у T,s -діаграмі – логарифмічна крива з позитивною теплоємністю, що йде у бік збільшення температури (рис. 5.3). Визначені з розрахунку величини якісно відповідають даним зображенням процесу: $\ell < 0$, тому що $dv < 0$ і $q > 0$, так як $ds > 0$.

Окремі випадки процесів ідеальних газів

5.2. У герметичному твердому резервуарі місткістю $0,1 \text{ м}^3$ знаходиться ідеальне повітря ($\mu=28,96 \text{ кг/кмоль}$, $i=5$) при тиску 2 бари та температурі $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Яку кількість теплоти необхідно повідомити повітря в резервуарі, щоб підвищити його тиск до 4 бар? Зобразити процес у діаграмах p,v та T,s .

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_v і C_p .

Відповідь: 50 кДж .

5.3. 1 кг азоту (N_2) з початковими параметрами $p_1=10 \text{ бар}$, $t_1=300 \text{ }^\circ\text{C}$ розширюється до збільшення п'ятикратного обсягу. Вважаючи, що розширення а) ізобарне, б) ізотермічне, в) адіабатне, визначити кінцеві параметри p_2 , t_2 , v_2 , роботу зміни обсягу та теплоту процесу. Зобразити процеси в діаграмах p,v та T,s .

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_v і C_p .

Відповідь: $v_2 = 0,85 \text{ м}^3/\text{кг}$.

а) $t_2 = 2592 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_2 = 10 \text{ бар}$, $\ell=680 \text{ кДж/кг}$, $q=2382 \text{ кДж/кг}$;

б) $t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_2 = 2 \text{ бар}$, $\ell=q=274 \text{ кДж/кг}$;

в) $t_2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_2 = 1,05 \text{ бар}$, $\ell=680 \text{ кДж/кг}$, $q=2382 \text{ кДж/кг}$.

5.4. Один кілограм ідеального повітря ($\mu=28,96 \text{ кг/кмоль}$, $i=5$) з початковими параметрами $p_1=1 \text{ бар}$, $t_1=30 \text{ }^\circ\text{C}$ стискається до тиску $p_2=10 \text{ бар}$ двома способами:

1) ізотермічно;

2) адіабатний.

Визначити роботу, теплоту, кінцеві об'єм та температуру, зміну ентропії процесу. Зобразити процеси в p,v -і T,s -діаграмах.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: 1) $q=\ell = -200,3$ кДж/кг, $v_2=0,087$ м³/кг, $\Delta s=-0,661$ кДж/(кг·К);

2) $\ell = -202,4$ кДж/кг, $v_2=0,168$ м³/кг, $t_2=312$ °С.

5.5. Суміш газів має умовну молярну масу $\mu_{cm}=36$ кг/кмоль. За постійної температури суміш розширюється від $v_1=0,3$ м³/кг до $v_2=1$ м³/кг. Визначити зміну питомої ентропії суміші газів у цьому процесі.

Вважати гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $\Delta s=0,278$ кДж/(кг·К).

5.6. Суміш гелію He ($\mu_{He}=4$ кг/кмоль) та азоту N_2 ($\mu_{N_2}=28$ кг/кмоль) обернемо адіабатно стискається від $p_1=2$ бар, $t_1=17$ °С до $p_2=6$ бар. Вважаючи гази ідеальними з постійними c_v і c_p , визначити v_2 , якщо $r_{He} = 0,6$.

Відповідь: $v_2 = 0,431$ м³/кг.

5.7. Газова суміш має склад за масою: $H_2 - 10\%$, $CO_2 - 10\%$, $CH_4 - 30\%$, $N_2 - 50\%$. Початкові параметри суміші: $p_1 = 2$ бар, $t_1 = 27$ °С. Визначити кінцеву температуру та питому роботу зміни обсягу, якщо суміш обернемо адіабатно стискається до $p_2=10$ бар.

Вважати гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $t_2 = 195$ °С, $\ell = -325$ кДж/кг.

5.8. Суміш газів CH_4 і CO адіабатно розширюється від $p_1=6$ бар і $t_1=227$ °С до $p_2=1$ бар. Масова частка $g_{CH_4}=0,4$. Визначити температуру t_2 та роботу зміни обсягу у цьому процесі.

Вважати гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $T_2 = 311$ К, $\ell = 202$ кДж/кг.

5.9. Суміш газів N_2 і NH_3 при $r_{N_2}=0,3$ адіабатно стискається від $p_1=1$ бар і $t_1=47$ °С до $p_2=5$ бар. Визначити зміну ентальпії процесу та роботу зміни обсягу.

Вважати гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $\Delta h=262$ кДж/кг, $\ell = -194$ кДж/кг.

5.10. Газова суміш, що складається з H_2 та CH_4 , з теплоємністю $\mu_{c_{p_{cm}}}=30,3$ кДж/(кмоль·К) нагрівається при постійному тиску від $t_1=17$ °С до $t_2=300$ °С. Вважаючи гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P , визначити зміну ентальпії та ентропії цього процесу.

Відповідь: $\Delta h_{cm}=1415$ кДж/кг, $\Delta s_{cm}=3,41$ кДж/(кг·К).

5.11. Газова суміш, що складається з H_2 і CH_4 і має постійну газову $R_{cm}=692,8$ Дж/(кг·К), нагрівається при постійному тиску від $t_1=17$ °С до $t_2=300$ °С. Вважаючи гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P , визначити зміну ентальпії та ентропії процесу.

Відповідь: $\Delta h_{cm}=756$ кДж/кг, $\Delta s_{cm}=1,82$ кДж/(кг·К).

5.12. Суміш газів N_2 і CO_2 , що має постійну газову $R_{cm}=259,8$ Дж/(кг·К), адіабатно розширюється від $p_1=6$ бар, $t_1=500$ °С до $p_2=1$ бар. Визначити питому роботу зміни обсягу та зміну ентальпії даного процесу.

Вважати гази ідеальними з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $\ell=206$ кДж/кг, $\Delta h_{cm} = -284$ кДж/кг.

Політропні процеси ідеальних газів

5.13. Повітря ($\mu=28,96$ кг/кмоль, $i=5$) політропно з $n=1,2$ переходить зі стану з $p_1=6$ бар і $t_1=320$ °С стан з тиском $p_2=1$ бар. Визначити: параметри початкової та кінцевої точок (v, T, s), питому теплоту та роботу зміни обсягу. Зобразити процес у p, v -і T, s -діаграмах.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $v_1=0,284$ м³/кг, $s_1=268$ Дж/(кг·К),

$v_2 = 1,27$ м³/кг; $T_2 = 439,6$; $s_2=482$ Дж/(кг·К)

(початок відліку ентропій $s_0=0$ взято за н.ф.у.);

$q=110$ кДж/кг; $\ell= 220$ кДж/кг.

5.14. Азот (N_2) у політропному процесі змінює тиск і температуру від $p_1=8$ бар і $t_1=27$ °С до $v_2=0,176$ м³/кг та $t_2=200$ °С. Визначити роботу зміни обсягу цього процесу та зобразити його в p, v -і T, s -діаграмах.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $\ell= 51,4$ кДж/кг.

5.15. 5 кг кисню O_2 ($\mu=32$ кг/кмоль) політропно переходить зі стану з $p_1=1$ бар і $T_1=290$ К стану з $p_2=4$ бар і $T_2=204$ К. Визначити показник політропи, кількість теплоти, кінцевий об'єм і роботу зміни обсягу даного процесу. Зобразіть процес у p, v -і T, s -діаграмах.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $n = 0,8$, $V_2 = 0,663$ м³, $Q = - 837,9$ кДж, $L = - 558,6$ кДж.

5.16. 4 м³ повітря ($\mu=28,96$ кг/кмоль) при $p_1=8$ бар $t_1=160$ °С розширюється політропно до $p_2=1$ бар, при цьому його обсяг збільшується у 6 разів. Визначити роботу зміни обсягу та кількість теплоти процесу. Зобразити процес у діаграмах p, v та T, s .

Вважати газ ідеальним двоатомним з $v=const$ і $c=const$.

Відповідь: $L = 5$ МДж, $Q = 3$ МДж.

5.17. У політропному процесі змінюється стан 1 кг повітря ($\mu=28,96$ кг/кмоль) від $p_1 = 1$ бар, $t_1 = 10$ °С до $t_2 = 400$ °С за рахунок відведення теплоти в кількості 280 кДж/кг. Визначити показник політропи, кінцевий тиск і обсяг, питома робота зміни обсягу, зміна внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії процесу. Зобразити процес у діаграмах p, v і T, s .

Вважати газ ідеальним двоатомним з $c_v=const$ і $c_p=const$.

Відповідь: $n=1,2$, $p_2=180$ бар, $v_2=0,0107$ м³/кг;
 $\ell=560$ кДж/кг, $\Delta s=-622$ Дж/(кг·К), $\Delta h=393$ кДж/кг.

5.18. У політропному процесі розширення двоатомного газу 1/3 сполученого газу теплоти пішла збільшення його внутрішньої енергії. Визначити показник політропи цього процесу та зобразити процес у p, v - та T, s -діаграмах.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $n = 0,8$.

5.19. У політропному процесі з $\alpha=0,4$ ($\alpha=du/\delta q$) стан газу N_2 змінюється від $p_1=10$ бар та $t_1=350$ °С до $p_2=1$ бар. Визначити питому теплоту та зміну ентропії газу в цьому процесі.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $q=1515$ кДж/кг, $\Delta s=1,55$ кДж/(кг·К)

5.20. Повітря складається з N_2 та O_2 і має об'ємну частку $r_{N_2}=0,4$. Визначити зміну ентальпії цього повітря за його політропному нагріванні від 10 °С до 410 °С.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $\Delta h=382,9$ кДж/кг.

5.21. Газова суміш, що складається за обсягом з 30% вуглекислого газу (CO_2) та 70% кисню (O_2), при температурі 120 °С тиском 3 бар займає об'єм $0,5$ м³. Газ політропно з $n=0,8$ розширюється, причому його обсяг збільшується в 3 рази. Вважаючи гази ідеальними з жорсткими молекулами, визначити кількість теплоти, роботу зміни обсягу, зміну внутрішньої енергії та ентропії процесу. Зобразити процес у діаграмах p, v та T, s .

Відповідь: $Q=282$ кДж, $L=184$ кДж, $\Delta U=98$ кДж, $\Delta S=0,642$ кДж/К.

5.22. Двохатомний газ, що має теплоємність $c_v=0,65$ кДж/(кг·К), політропно переходить зі стану з $t_1=17$ °С і $v_1=0,8$ м³/кг стан з $p_2=8$ бар і $t_2=277$ °С. Визначити питому зміну ентропії та теплоту процесу.

Вважати газ ідеальним з постійними теплоємностями C_V і C_P .

Відповідь: $\Delta s=26,4$ Дж/(кг·К), $q=10,72$ кДж/кг.

5.23. На якому із зазначених у p, v - діаграмі процесів ідеального газу (рис. 5.4) найбільше підвищення температури та підведення теплоти?

Для відповіді необхідно перебудувати процеси в T, s -діаграму.

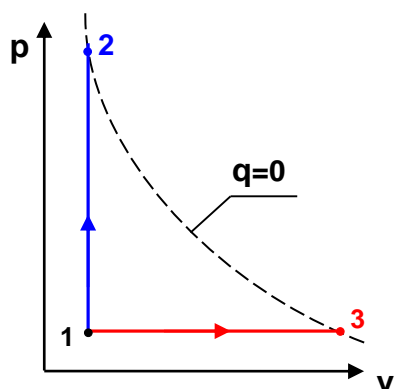


Рис. 5.4. До задачі 5.23

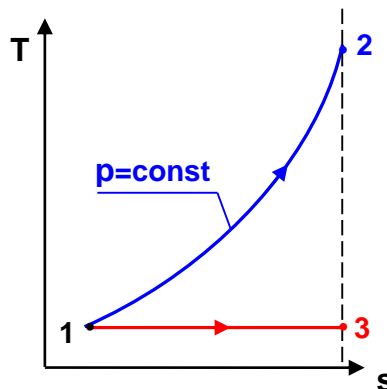


Рис. 5.5. До задачі 5.24

5.24. На якому із зазначених на рис. 5.5 у T,s -діаграмі процесів ідеального газу найбільша зміна обсягу?

5.25. Перебудувати цикли ідеальних газів (рис. 5.6) з T,s -в p,v -діаграми.

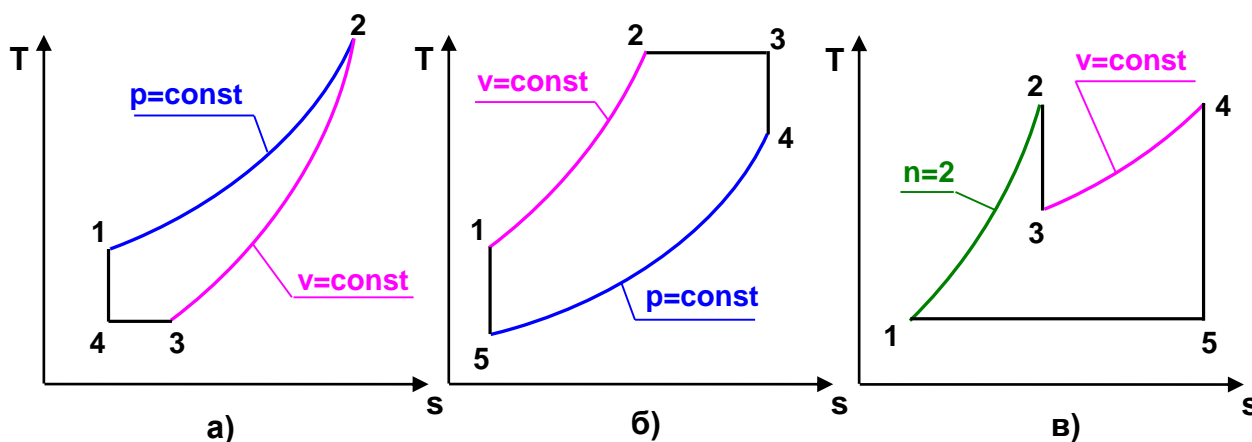


Рис. 5.6. До задачі 5.25

5.26. Перебудувати з p,v -діаграми в T,s -діаграму процеси та цикли ідеальних газів (рис. 5.7).

5.27. У діаграмах p,v і T,s послідовно зобразити процеси ідеальних газів згідно з заданою умовою:

- 1-2 ізобарний процес із відведенням теплоти;
- 2-3 політропний процес стискування при $n=1,25$;
- 3-4 адіабатний процес розширення;
- 4-5 ізотермічний процес стискування;
- 5-6 ізохорний процес із відведенням теплом.

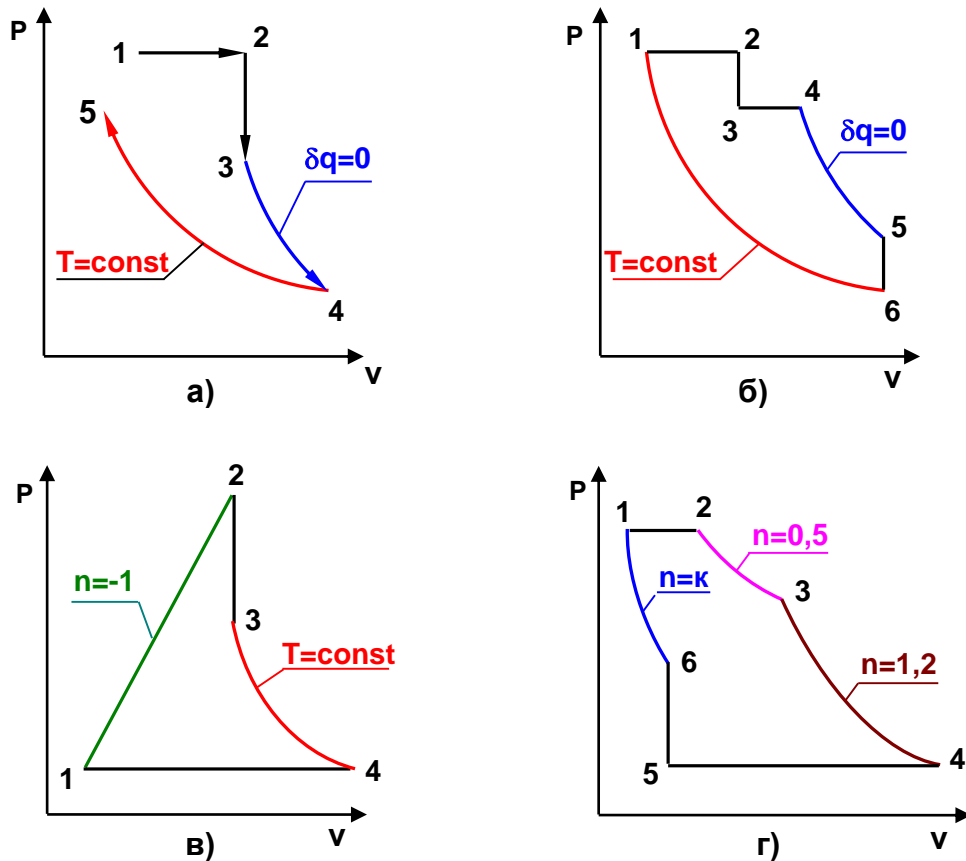


Рис. 5.7. До задачі 5.26

5.2. Особливості розрахунку процесів ідеальних газів при врахуванні впливу температури на їх ізобарну та ізохорну теплоємності

На відміну від кінетичної теорії газів квантова теорія дозволяє врахувати коливальний рух атомів усередині молекул двох- та багатоатомних газів. Відповідно до цієї теорії мольна ізохорна теплоємність газу представляє функціональну залежність від температури. Рівняння ізохорної та ізобарної теплоємностей ідеальних газів з урахуванням впливу температури на їх значення мають дуже складний вигляд, тому значення цих теплоємностей та похідних від них енергетичних функцій стану u , h , отримані розрахунковим шляхом, зводяться до спеціальних довідкових таблиць (2.2-2.6).

У цих таблицях крім u , h для ідеальних газів наводяться значення відносних тисків $\pi_0 = p/p_0$, обсягів $\theta_0 = v/v_0$, які використовуються тільки для адіабатних процесів при знаходженні параметрів другої точки процесу без використання коефіцієнта Пуассона за співвідношенням

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\pi_{02}}{\pi_{01}}, \text{ або } \frac{v_2}{v_1} = \frac{\theta_{02}}{\theta_{01}}. \quad (5.8)$$

Також у цих таблицях дається та частина питомої ентропії ідеальних газів, яка залежить від температури:

$$s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p dT}{T}, \quad (5.9)$$

де $T_0 = 0 \text{ К}$.

Вся абсолютна величина питомої ентропії газу розраховується за виразом

$$s = s_0 - R \cdot \ln \frac{p}{p_0}, \quad (5.10)$$

де p_0 приймається довільно.

Приклад розрахунку процесу ідеальних газів із використанням таблиць (2.1-2.6).

Розрахувати у оборотному процесі 1-2-3 (рис. 5.8) ідеального повітря питомі теплоту та зміну ентропії, вважаючи c_v і c_p залежить від температури. Процес 1-2 - адіабатний стиск повітря від $p_1=1$ бар і $t_1=17$ °С до $p_2=10$ бар, 2-3 - при $p_2 = \text{const}$ від t_2 до $t_3 = 20$ °С.

Рішення

Використовуючи таблиці термодинамічних властивостей повітря (табл. 2.3), знаходимо π_{01} за відомою температурою $t_1=17$ °С. Визначивши $\pi_{01}=1,2339$, розраховуємо π_{02} за відомим відношенням тисків адіабатного процесу:

$$\pi_{02} = \pi_{01} \frac{p_2}{p_1} = 1,2339 \cdot 10 = 12,339$$

Використовуючи π_{02} , Визначаємо по таблицях (табл. 2.3) температуру в кінці адіабатного процесу $t_2 = 283$ °С (взято з точністю до 1°).

Знаючи температури у всіх трьох точках складного процесу, визначимо за ними з таблиць необхідні для розрахунку енергетичні параметри:

$$h_1=290,28 \text{ кДж/кг}, u_1=207,01 \text{ кДж/кг}, h_2=561,13 \text{ кДж/кг}, \\ u_2=401,52 \text{ кДж/кг}, h_3=293,29 \text{ кДж/кг}, u_3=209,16 \text{ кДж/кг}.$$

Для адіабатного процесу 1-2 визначимо:

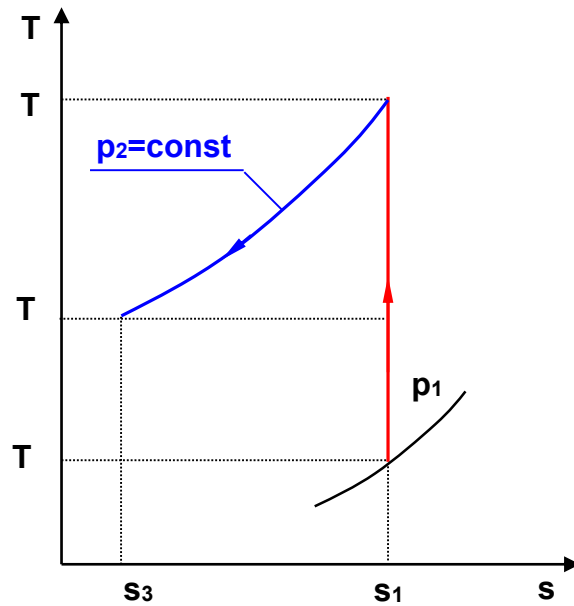


Рис. 5.8. Наприклад, розрахунку процесу з використанням таблиць термодинамічних властивостей ідеальних газів.

$$h_2 - h_1 = 561,13 - 290,28 = 270,85 \text{ кДж/кг,}$$

$$u_2 - u_1 = -l = 401,52 - 207,01 = 199,51 \text{ кДж/кг.}$$

У ізобарному процесі 2-3 кількість питомої теплоти розраховується як різниця його питомих ентальпій:

$$q_{2-3} = h_3 - h_2 = 293,29 - 561,13 = -267,84 \text{ кДж/кг.}$$

Розрахунок зміни питомої ентропії в процесі 2-3 виконується з використанням $s_{02} = 7,3298 \text{ кДж/(кгК)}$ і $s_{03} = 6,6789 \text{ кДж/(кгК)}$, які визначаються по t_2 і t_3 [15]:

$$\begin{aligned} s_3 - s_2 &= s_{03} - s_{02} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_2} = s_{03} - s_{02} = \\ &= 6,6789 - 7,3298 = -0,6509 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Зміна ентропії відбувається за рахунок зміни температури, так як процес 2-3 ізобарний.

Для визначення абсолютних значень ентропій необхідно задати величину p_0 . Приймавши $p_0 = 1 \text{ бар}$, розрахуємо s_1 , s_2 та s_3 :

$$s_1 = s_{01} - R \cdot \ln \frac{p_1}{p_0} = 6,6686 - \frac{8,314}{28,97} \cdot \ln \frac{1}{1} = 6,6686 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$s_2 = s_{02} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_0} = 7,3298 - \frac{8,314}{28,97} \cdot \ln \frac{10}{1} = 6,6689 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Так як в межах похибки розрахунків $s_1 = s_2$, це підтверджує, що процес 1-2 адіабатний.

$$s_3 = s_{03} - R \cdot \ln \frac{p_3}{p_0} = 6,6789 - \frac{8,314}{28,97} \cdot \ln \frac{10}{1} = 6,0181 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Перевіримо раніше отримане значення різниці ентропій $s_3 - s_2$ по різниці абсолютних ентропій у цих точках:

$$s_3 - s_2 = 6,0181 - 6,6689 = -0,6508 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

І тут збіжність результатів теж очевидна.

5.3. Завдання

5.28. Повітря з початковими параметрами $p_1=5$ бар, $t_1=280$ °С адіабатно розширюється до тиску $p_2=2$ бар. Користуючись таблицями термодинамічних властивостей газів (табл. 2.1-2.6), визначити кінцеві значення температури та питомого об'єму, роботу зміни об'єму.

Відповідь: $t_2 = 155$ °С, $v_2 = 0,615$ м³/кг, $\ell=92,6$ кДж/кг.

5.29. Повітря адіабатно розширюється від $p_1=10$ бар та $t_1=360$ °С до $p_2=1$ бар. Використовуючи таблиці залежності термодинамічних властивостей газів від температури (табл. 2.1-2.6), визначити зміну ентальпії та внутрішньої енергії повітря у цьому процесі. Порівняти отримані результати з результатами розрахунку цих же величин, вважаючи теплоємності газу C_v і C_p , що не залежать від температури.

Відповідь: $\Delta h=-309$ кДж/кг, $\Delta u=-223$ кДж/кг;

$$\delta(\Delta h) = 0,84\% (\Delta h=-306,7 \text{ кДж/кг});$$

$$\delta(\Delta u) = 1,78\% (\Delta u = -223 \text{ кДж/кг}).$$

5.30. Визначити теплоту та зміну внутрішньої енергії повітря, що ізобарно розширюється від $t=20$ °С до дворазового збільшення об'єму. Розрахунки виконати двома способами:

а) вважаючи теплоємності повітря c_v і c_p , що не залежать від температури,

б) використовуючи таблиці залежності термодинамічних властивостей газів від температури (табл. 2.1-2.6).

Оцінити похибку розрахунків шуканих величин за способом (а) стосовно способу (б).

Відповідь: а) $q=294,4$ кДж/кг, $\Delta u=210,29$ кДж/кг;

$$\text{б) } q=299,16 \text{ кДж/кг, } \Delta u=215,1 \text{ кДж/кг};$$

$$\delta q=1,67\%, \delta(\Delta u) = 2,2\%.$$

5.31. У балоні постійного об'єму двоокис вуглецю (CO_2) нагрівається від тиску

$p_1=2$ бар та температури $t_1=10$ °С тиску $p_1=4,05$ бар. Користуючись таблицями (табл. 2.6), Визначити кінцеві параметри газу (t_2, v_2, u_2, h_2) і кількість витраченої питомої теплоти в цьому процесі.

Відповідь: $t_2=300$ °С, $v_2=0,268$ м³/кг, $u_2=369,08$ кДж/кг,
 $h_2=447,36$ кДж/кг, $q=249,26$ кДж/кг.

5.32. У конвективних газоходах парогенератора продукти згоряння палива ізобарно охолоджуються від $t_1=1050$ °С до $t_2=140$ °С. Склад газів заданий за обсягом: $r_{CO_2}=0,15$, $r_{O_2}=0,06$, $r_{N_2}=0,79$.

Визначити кількість теплоти, яка віддається 1 кг газів. При розрахунку використовувати дані таблиць С.Л. Рівкіна (табл. 2.4 - 2.6).

Примітка: у таблицях дивитися атмосферний азот.

Вказівка:

при $p=\text{const}$ ентальпії кінцевого та початкового станів суміші визначаються

виразом $h_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} g_i h_i$,

де g_i -масові частки кожного компонента газової суміші

Відповідь: $q=-1032$ кДж/кг.

5.33. Кисень з початковими параметрами $p_1=1$ МПа та $t_1=400$ °С розширюється адіабатно до тиску $p_2=0,2$ МПа. Користуючись таблицями термодинамічних властивостей газів (табл. 2.5), Визначити кінцеву температуру, початковий і кінцевий питомі обсяги, питому роботу зміни обсягу та зміна ентальпії в процесі.

Відповідь: $t_2=167$ °С, $v_1=0,175$ м³/кг, $v_2=0,572$ м³/кг;
 $\ell=169,8$ кДж/кг, $h_2-h_1= -230,4$ кДж/кг.

5.4. Контрольні питання

1. Яка величина характеризує закономірність енергетичної взаємодії газу та зовнішнього середовища у політропному процесі?
2. Яка величина характеризує закономірність зміни термічних параметрів у політропному процесі ідеального газу?
3. Яка величина характеризує закономірність політропи ідеального газу в T,s-діаграмі?
4. Зобразіть у діаграмах p,v і T,s політропні процеси розширення ідеального газу з показником політропи $1 < n < k$, оцініть теплоємність цього процесу.
5. Які величини використовуються замість коефіцієнта Пуассона для визначення температури другої точки за двома відомими параметрами першої точки та тиском або обсягом другої точки в оборотних адіабатних процесах ідеальних газів при врахуванні впливу температури на теплоємності c_v і c_p ?

6. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ І ВОДЯНОГО ПАРУ. ПРОЦЕСИ ВОДЯНОГО ПАРУ

Термодинамічні властивості води та водяної пари не можуть бути описані зручними для використання універсальними рівняннями, аналогічними рівнянням ідеальних газів. У інженерній практиці стала вельми поширеною отримали таблиці термодинамічних властивостей речовин і побудовані з їхньої основи діаграми залежностей параметрів стану. У цих таблицях залежність термічних параметрів стану зазвичай визначається експериментально. На основі цих залежностей з використанням диференціальних рівнянь термодинаміки та низки дослідних величин (q , c_p тощо) розраховують значення енергетичних параметрів (функцій стану) h , u , s .

Для ілюстрації процесів зміни стану води та водяної пари та парових циклів широко використовуються p, v -, T, s - та h, s -діаграми (рис. 6.1, 6.2, 6.3). Вони дають великий обсяг інформації, дозволяють наочно судити про фазові стани води, особливості її процесів та спрощують визначення параметрів води в цих процесах.

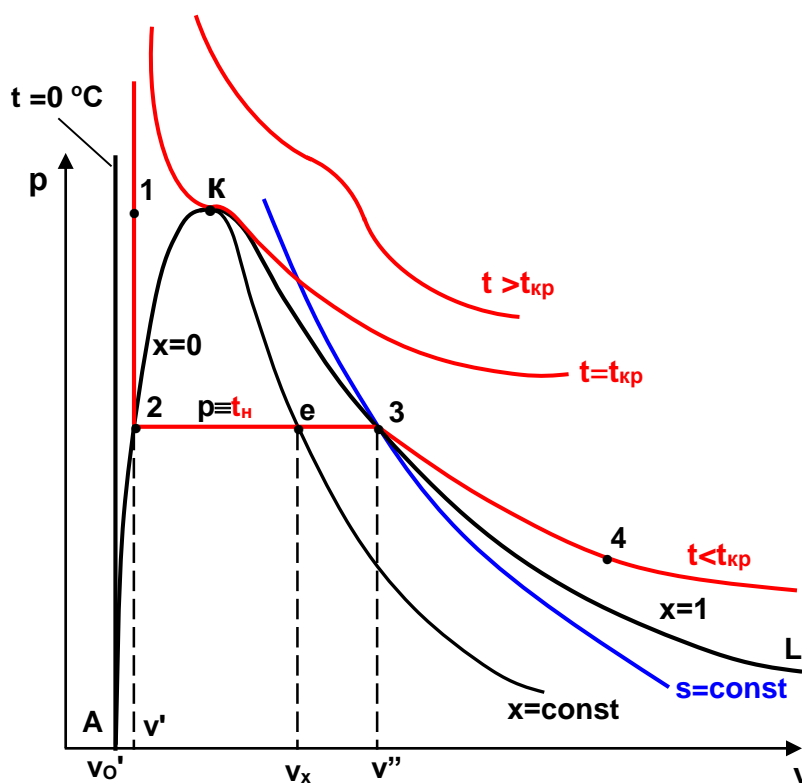


Рис. 6.1. Основні процеси води та водяної пари у p, v - діаграмі

На рис. 6.1 представлені в p, v -діаграмі області фазових станів та основні процеси для рідкої та парової фаз води:

- між вертикальною ізотермою $0^\circ C$ області рідини і лінією стану насичення рідини $x=0$ знаходиться область рідкої фази води;

- вище лінії стану сухої насиченої пари $x=1$ знаходиться область перегрітої пари;
- між лініями $x=0$ і $x=1$ знаходиться область вологої насиченої пари;
- докритична ізотерма 1-2-3-4, в області рідини (1-2) близька до вертикальної прямої з незначним зміщенням вліво, в області вологої пари (2-3) збігається з ізобарою насичення, в області перегрітої пари (3-4) представляє криву опуклістю вниз;
- критична ізотерма $t_{кр}$ має точку перегину в критичній точці;
- надкритична ізотерма $t > t_{кр}$ також має точку перегину, що при великих значеннях температури пропадає;
- лінії постійних ентропій ($s=const$) є криві опуклістю вниз, причому лінії $s < s_{кр}$ перетинають тільки лінію $x=0$, а лінії $s > s_{кр}$ перетинають тільки лінію $x=1$;
- лінії $x=const$ відповідають співвідношенню відрізків:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}$$

Питомий об'єм рідини сильно відрізняється від питомого об'єму насиченої сухої пари, тому лінія $x=0$ більш крута, ніж лінія $x=1$.

У тепловій діаграмі T,s (рис. 6.2) показано:

- лінія $x=0$ починається в потрійній точці рідини (точка 1, $T_0=273,16$ К, $s_1'=0$);
- область рідкої фази знаходиться вище за лінію $x = 0$;
- точка N відповідає сухому насиченому пару потрійної точки води;
- горизонтальна пряма 1-N, нижче за яку й обмеженою справа лінією $x=1$ знаходиться зона сублімації (суміш твердої фази води та пари);
- область перегрітої пари знаходиться вище за лінію $x=1$.

Видимої зони переходу від області рідкої фази до області пари вище критичної точки K немає.

Ізобару докритичного тиску в T,s -діаграмі являє собою складну криву 1-2-3-4. Вона складається з трьох характерних частин: 1-2 – в області рідини – це крива опуклістю вниз, що близько розташована до лінії $x = 0$; 2-3 – в області вологої насиченої пари, вона збігається з ізотермою насичення; 3-4 – в області перегрітої пари – це крива опуклістю вниз, що є логарифмічною кривою зі змінною логарифмікою.

Площа під ізобарою 1-2 (нагрівання рідини) відповідає питомій теплоті рідини q' , під ізобарою 2-3 (пароутворення) – питомій теплоті пароутворення r , під 3-4 (перегрів пари) – питомій теплоті перегріву q_p .

Ізобари критичного тиску ($p=p_{кр}$) в критичній точці має перегин, тут дотична до неї є горизонтальна пряма. Ізобари надкритичного тиску являють собою криві, що безперервно підвищуються, з точками перегину, в яких дотичні мають мінімальний нахил. Цим точкам відповідають максимальні значення ізобарної теплоємності.

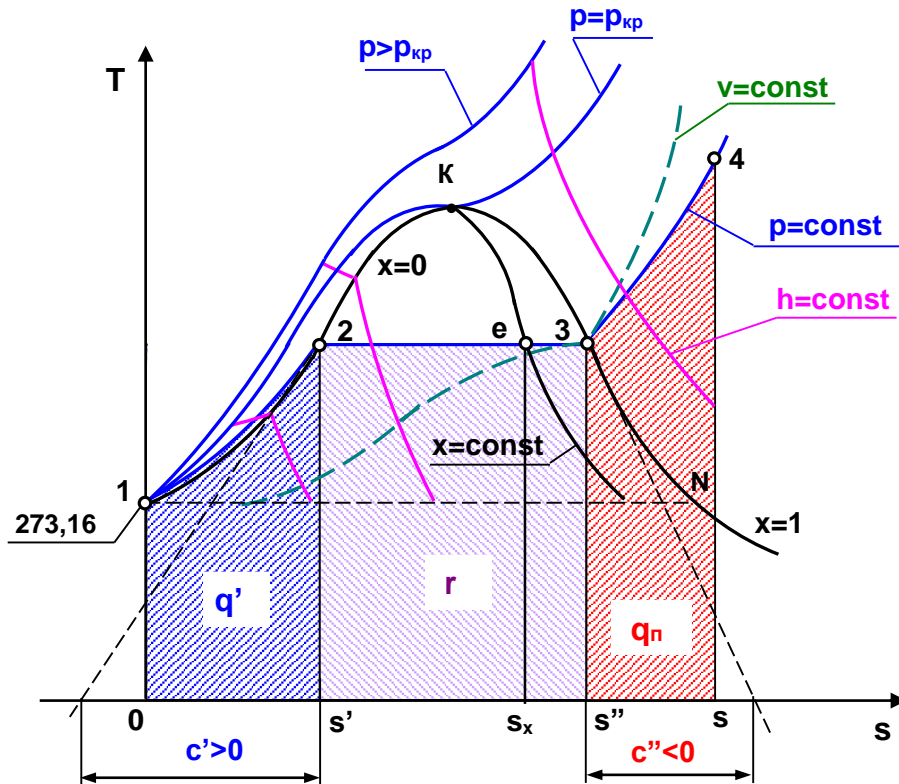


Рис. 6.2. Діаграма T,s для води та водяної пари

Ізохори з $v > v_{кр}$ перетинають лише праву прикордонну криву $x=1$ (рис.6.2). В області перегрітої пари вони являють собою увігнуті криві (крутіше ізобар), а в області вологої пари - криві двоякої кривизни: опуклі - при великих ступенях сухості і увігнуті - при малих ступенях сухості.

Ізохори з $v < v_{кр}$ перетинають тільки нижню прикордонну криву $x=0$ і розміщуються в області рідини при високих тисках і температурах, а в області насиченої вологої пари – при низьких тисках і температурах.

На рис. 6.2 показані лінії постійних ентальпій $h = const$. В області перегрітої пари ізоентальпа є плавною кривою з негативним тангенсом кута нахилу до неї. Ізоентальпи, що переходять з області вологої пари в область рідини, мають яскраво виражену точку зламу на лінії $x=0$.

На рис. 6.2 у точках 2 та 3 проведені дотичні до прикордонних кривих $x=0$ та $x=1$. Підкасальні c' і c'' являють собою теплоємності рідини і насиченої сухої пари на прикордонних кривих $x=0$ і $x=1$.

В інженерній практиці найбільш широке застосування знаходить h,s -діаграма для води та водяної пари. На рис. 6.3 наведено загальний вигляд такої діаграми.

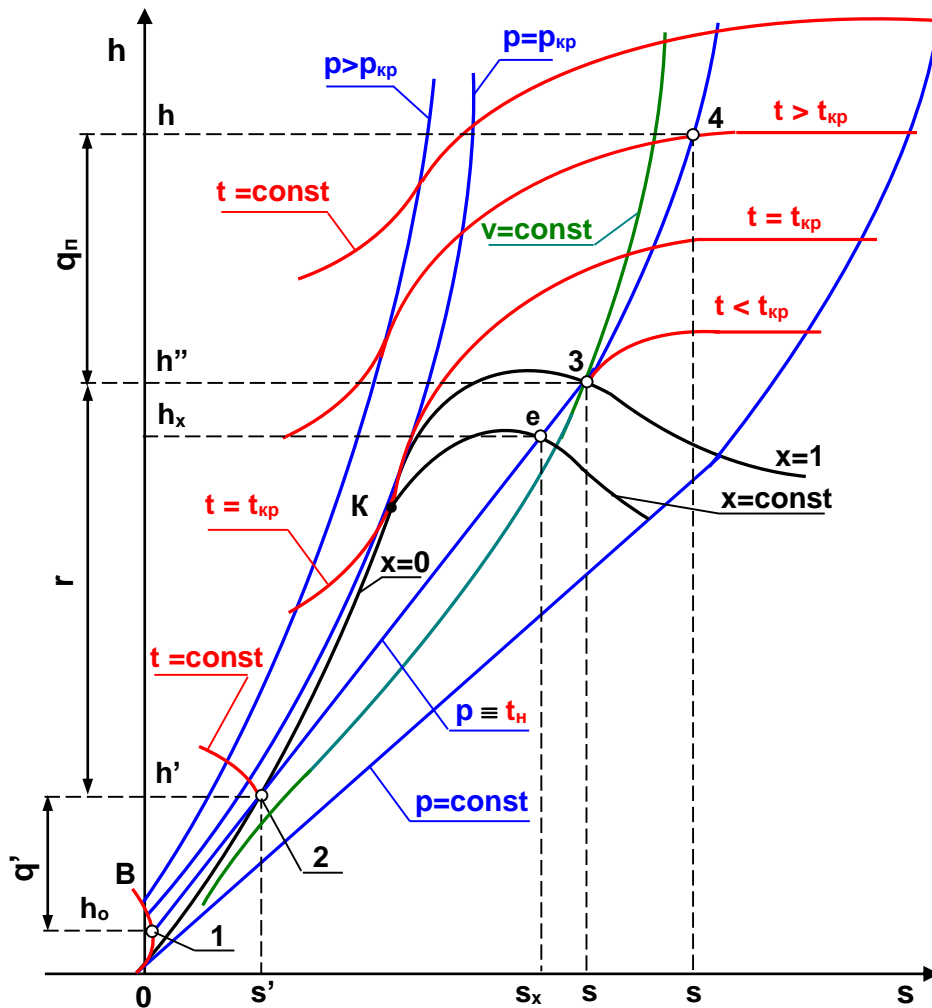


Рис. 6.3. Діаграма h,s для води та водяної пари

При підвищенні тиску і температури ентальпія h' і ентропія s' рідини на лінії насичення ростуть до критичної точки, тому лінія $x = 0$ являє собою криву увігнуту ОК.

Прикордонна крива сухої насиченої пари $x=1$ має вигляд кривої KN. Максимальне значення ентальпії (ординати) цієї кривої h''_{\max} досягається при тиску близько 30 бар із критичної точки.

Всі ізобари в ділянці рідини виходять з ізотерми $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, що має форму кривої ОВ опуклістю вгору.

Докритичні ізобари рідини являють собою увігнуті криві, що йдуть зліва направо, оскільки процес нагрівання рідини 1-2 супроводжується зростанням ентропії та підвищенням температури.

В процесі ізобарного пароутворення 2-3 температура залишається постійною, і ділянка ізобари 2-3 являє собою пряму тангенс кута нахилу якої визначається температурою насичення T_n . На прикордонних кривих ($x=0$ і $x=1$) вода має ту саму температуру, отже, пряма 2-3 є дотичною до кривих 1-2 і 3-4.

З підвищенням тиску збільшується температура насичення, і в області вологої насиченої пари ізобари (ізотерми) вільноподібно розходяться.

Ізобари пароутворення 2-3 плавно переходять в ізобари перегрітої пари 3-

4, що являють собою увігнуті криві, що розходяться, при великому ступені перегріву наближаються до кривих логарифмічного характеру (як для газів).

Критична ізобара проходить через критичну точку K і є увігнутою кривою. Ізобари надкритичного тиску мають такий самий вигляд.

Ізотерми в h,s -діаграмі являють собою складні лінії. Докритичні ізотерми рідини за низьких температур починаючи від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, з підвищенням тиску піднімаються вгору (криві опуклістю вгору); за високих температур – крива опуклістю вниз.

В області вологої пари докритичні ізотерми збігаються з ізобарами. В області перегрітої пари ізотерми мають вигляд кривих опуклістю вгору, що йдуть зліва направо. При температурах, близьких до критичної, в області високих тисків ізотерми перегрітої пари круто йдуть нагору, маючи велику кривизну. В областях низьких тисків всі ізотерми перегрітої пари наближаються до горизонтальних прямих (властивості пари близькі до властивостей ідеального газу).

Надкритичні ізотерми мають точку перегину, а критична ізотерма ця точка відповідає критичній точці.

Ізохори в h,s -діаграмі являють собою плавні криві, крутіше ізобар. Вони перетинають лише одну прикордонну криву ($x=0$ або $x=1$), залежно від того, питомий об'єм їх менший або більший за питому об'єм води в критичній точці.

На рис. 6.3 виділено ізобара 1-2-3-4 і показано у вигляді відрізків значення ентальпії, ентропії та їх різниці для характерних станів води та пари на цій ізобарі. Точці 1 відповідає стан рідини при $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ даної ізобари.

Визначення параметрів води та водяної пари з використанням таблиць термодинамічних властивостей (дод. 3) виконується за трьома таблицями: таблицями властивостей води та пари в стані насичення як функцій температури (табл. 3.1) і тиску (табл. 3.2).

У табл. 3.1 і 3.2, як визначальні параметри може виступати будь-який з параметрів стану насичення води і пари: $p_n, t_n, v', h', s', v'', h'', s''$.

Як визначальні параметри (крім p і t) може виступати будь-яка пара параметрів: p, t, v, h, s .

Вибираючи табл. 3.1, 3.2 для визначення параметрів води необхідно визначити фазовий стан. Визначення фазового стану води та водяної пари з використанням таблиць (дод. 3) виконується за наступним алгоритмом:

1) при $p = \text{const}$:

$t < t_n$ – рідка фаза води;

$t > t_n$ - перегріта пара;

$t = t_n$ - необхідний 3-й параметр,

наприклад при заданому h :

$h = h'$ - кипляча вода, $x = 0$, табл. 3.1, 3.2;

$h = h''$ - суха насичена пара,

$h' < h < h''$ - волога пара,

$h < h'$ - рідка фаза води,

$h > h''$ - перегріта пара,

$h' < h < h''$ - волога пара.

аналогічно і за заданих параметрах v або s

2) при $t = \text{const}$:

$p < p_n$ - перегріта пара,

$p > p_n$ - рідка фаза води,

$p = p_n$ - аналогічно $t = t_n$ при $p = \text{const}$ з орієнтацією на h, v, s .

Питома внутрішня енергія в таблицях відсутня, її розраховують через ентальпію, тиск та питомий обсяг за виразом

$$u = h - pv$$

У цьому виразі необхідно привести до єдиної розмірності всі величини, для цього при використанні питомої ентальпії в кДж/кг тиск підставляють у кПа, тоді і питома внутрішня енергія матиме розмірність кДж/кг.

Розрахунок питомого обсягу, ентальпії, ентропії та внутрішньої енергії для вологої насиченої водяної пари виконується за формулами

$$v_x = v' + x(v'' - v') ; \quad (6.1)$$

$$h_x = h' + x(h'' - h') = h' + xr ; \quad (6.2)$$

$$s_x = s' + x(s'' - s') ; \quad (6.3)$$

$$u_x = u' + x(u'' - u') = h_x - pv_x . \quad (6.4)$$

Використовуючи параметри вологої насиченої пари, можна розрахувати її ступінь сухості:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} . \quad (6.5)$$

Розрахунок термодинамічних процесів води та водяної пари виконується на підставі першого закону термодинаміки з використанням таблиць та діаграм термодинамічних властивостей H_2O . Для розрахунків використовуються такі вирази:

$$\delta q = du + pdv , \quad \delta q = dh - vdp , \quad \delta q = Tds , \quad \delta \ell = pdv .$$

Ці вирази наводяться до такого виду в конкретних процесах:

Ізохорний процес – $v = \text{const}$,

$$\delta \ell = pdv = 0, \quad dv = 0, \quad \delta q_v = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1) .$$

Изобарний процес – $p=\text{const}$,

$$\ell_p = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1), \quad q_p = h_2 - h_1,$$
$$u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1) = q_p - \ell_p.$$

Изотермічний процес – $T=\text{const}$,

$$q_T = T(s_2 - s_1), \quad u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1),$$
$$\ell_T = q_T - (u_2 - u_1).$$

Адіабатний процес – $q=0$ ($s=\text{const}$),

$$\ell_s = u_1 - u_2 = (h_1 - h_2) - (p_1 v_1 - p_2 v_2).$$

6.1. Задачі

Приклад розв'язання задачі:

6.1. Користуючись таблицями теплофізичних властивостей води та водяної пари (табл. 3.1-3.2), визначити фазовий стан води, її температуру та питомі енергетичні параметри: ентальпію, ентропію та внутрішню енергію, якщо $p=5$ бар, $v=0,2$ м³/кг.

Рішення

Спочатку визначають фазовий стан Н₂О:

за табл. 3.2 при $p=5$ бар знаходять питомі об'єми для рідини в стані насичення $v'=0,0010928$ м³/кг і для насиченої сухої пари $v''=0,37482$ м³/кг, а потім їх порівнюють із заданим об'ємом $v=0,2$ м³/кг. Оскільки $v' < v < v''$ то це стан вологої насиченої пари, для якого температура пари дорівнює температурі насичення $t_n=151,85$ °С.

Інші параметри визначають з використанням ступеня сухості, яку розраховують за заданим питомим обсягом:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0,2 - 0,0010928}{0,37482 - 0,0010928} = 0,532;$$

$$h = h' + x \cdot r = 640,1 + 0,532 \cdot 2108,4 = 1761,2 \text{ , кДж/кг};$$

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = 1,8604 + 0,532 \cdot 4,9611 = 4,4997 \text{ , кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Для визначення питомої внутрішньої енергії її розрахунковий вираз тиск підставляють у кПа, а питому ентальпію – в кДж/кг:

$$u = h - p v = 1761,2 - 500 \cdot 0,2 = 1661,2 \text{ кДж/кг}.$$

6.2. Тиск насиченої водяної пари $p_H = 7,5$ кПа. Визначити параметри сухої насиченої пари та води у стані насичення (кипіння) за таблицями теплофізичних властивостей води та водяної пари (t, v, h, v, s, u).

Відповідь:

для води: $t=40,32$ °С, $v=0,0010079$ м³/кг,

$h=168,77$ кДж/кг, $s=0,5763$ кДж/(кг·К), $u=168,76$ кДж/кг;

для пари: $t=40,32$ °С, $v=19,241$ м³/кг,

$h=2574,5$ кДж/кг, $s=8,2517$ кДж/(кг·К), $u=2430,2$ кДж/кг.

6.3. Визначити температуру, тиск та питому внутрішню енергію рідкої фази води у стані насичення при $h=500$ кДж/кг.

Відповідь: $t=119$ °С, $p=1,9233$ бар, $u=499$ кДж/кг.

6.4. Визначити питому внутрішню енергію сухої насиченої водяної пари при тиску 100 бар.

Відповідь: $u=2544,4$ кДж/кг.

6.5. Визначити температуру та значення питомих величин: об'єму, ентропії та внутрішньої енергії водяної пари при тиску $p=10$ бар та ступеня сухості $x=0,9$.

Відповідь: $t=179,88$ °С, $v=0,176$ м³/кг, $s=6,14$ кДж/(кг·К), $u=2400$ кДж/кг.

6.6. Водяна пара при температурі 200 °С має питому ентальпію 1200 кДж/кг. Визначити тиск, питоми об'єм та ентропію пари.

Відповідь: $p = 15,55$ бар; $v=0,0237$ м³/кг, $s=3,07$ кДж/(кг·К).

6.7. Визначати за таблицями 3.1-3.2 фазовий стан та параметри Н₂О (v, t, h, s) при тиску 10 бар та питомої внутрішньої енергії $u=2000$ кДж/кг.

Відповідь: волога насичена пара,

$t=179,88$ °С, $v=0,132$ м³/кг, $h=2132$ кДж/кг, $s=5,16$ кДж/(кг·К).

6.8. За заданими питомими ентальпією та ентропією: $h=2538$ кДж/кг, $s=6,325$ кДж/(кг·К), визначте за таблицями 3.1-3.2 фазовий стан Н₂О, його тиск і температуру. Поясніть метод раціонального пошуку параметрів p і t .

Відповідь: волога насичена пара, $p=5$ бар, $t=151,85$ °С.

6.9. У 1 м³ Н₂О при тиску 5 бар 1/20 частина об'єму зайнята рідиною в стані насичення, а 19/20 об'єму – насиченою сухою парою. Визначити масу сухої насиченої пари і рідини в цій суміші і внутрішню енергію 1 м³ цієї вологої насиченої пари.

Відповідь: $m_{ж.с.п.} = 45,75$ кг, $m_{с.н.п.} = 2,51$ кг, $U=35747$ кДж.

6.10. У посудині місткістю 5 м³ знаходиться волога насичена водяна пара при тиску 150 бар і ступеня сухості 0,3.

Визначити масу вологої пари в посудині та об'єм, що займає насиченою

рідиною та сухою насиченою парою.

Відповідь: $m=1,17$ т, $V'=1,36$ м³, $V''=3,64$ м³.

6.11. Визначити за таблицями 3.1-3.2 питомий об'єм та щільність водяної пари при тиску 5 бар та температурі 230 °С.

Відповідь: $v=0,4545$ м³/кг, $\rho=2,2$ кг/м³.

6.12. Визначити за таблицями 3.1-3.2 питому внутрішню енергію водяної пари при тиску 1 бар та температурі 117 °С.

Відповідь: $u=2533$ кДж/кг.

6.13. Визначити за таблицями 3.1-3.2 питому внутрішню енергію водяної пари при тиску 5 бар та ентальпії $h=2970$ кДж/кг.

Відповідь: $u=2730$ кДж/кг.

6.14. Визначити за таблицями 3.1-3.2 питому внутрішню енергію водяної пари при тиску 4,3 бар та температурі 250 °С.

Відповідь: $u=2722$ кДж/кг.

6.15. При температурі 280 °С внутрішня енергія водяної пари дорівнює 2750 кДж/кг. Визначити за таблицями 3.1-3.2 фазовий стан Н₂О та його тиск. Пояснити спосіб оптимального пошуку тиску.

Відповідь: перегріта пара, $p=15$ бар.

6.16. При тиску 4 бар відома питома внутрішня енергія Н₂О $u=2598,12$ кДж/кг. Визначити за таблицями 3.1-3.2 фазовий стан Н₂О та його параметри: t , h , s . Пояснити метод оптимального пошуку цих параметрів.

Відповідь: перегріта пара, $t=170$ °С, $h=2796,8$ кДж/кг, $s=7,0322$ кДж/(кг·К).

6.17. Визначити за таблицями 3.1-3.2 фазовий стан Н₂О, його тиск і температуру, якщо відомі питомі ентальпія та ентропія пари $h=2925$ кДж/кг, $s=6,21$ кДж/(кг·К). Пояснити метод оптимального пошуку параметрів.

Відповідь: перегріта пара, $p=50$ бар, $t=300$ °С.

6.18. Водяна пара з $t_1=350$ °С та $p_1=8$ бар охолоджується при постійному обсязі. У кінцевому стані $h_2 = 2400$ кДж/кг. Розрахувати цей процес, тобто визначити q , ℓ , Δu , Δs , Δh . Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $q=\Delta u=-632,2$ кДж/кг, $\ell=0$, $\Delta s= -1,35$ кДж/(кг·К), $\Delta h=-760$ кДж/кг.

6.19. У барабані парового котла ємністю 15 м³ знаходяться в термодинамічній рівновазі вода та пара загальною масою 7000 кг при тиску 10 бар. Яку кількість теплоти необхідно підвести до цієї пароводяної суміші, щоб тиск у котлі підвищився до 60 бар? Процес вважати ізохорним.

Зобразити процес у p,v -, T,s - і h,s -діаграмах.

Відповідь: $Q = 3300$ МДж.

6.20. Від 1 кг насиченої сухої водяної пари, що мав тиск 15 бар при постійному обсязі, відводиться теплота. Кінцева температура пари становить 90°C . Визначити кількість відведеної теплоти, зобразити процес у p,v -, T,s - і h,s -діаграмах.

Відповідь: $q = -2100$ кДж/кг.

6.21. У твердій замкнутій посудині знаходиться водяна пара з параметрами $p_1=35$ бар і $t_1=450^\circ\text{C}$. При теплообміні судини з довкіллям тиск пари падає до $p_2=5$ бар. Визначити кількість відведеної питомої (на 1 кг пари) теплоти. Зобразити процес у діаграмах p,v , T,s і h,s .

Відповідь: $q=-1909$ кДж/кг.

6.22. Один кубічний метр жорсткої ємності при тиску 5 бар заповнений на одну чверть об'єму водою у стані насичення, а на інші $\frac{3}{4}V$ – сухою насиченою парою (рис.6.4). Визначити, яку мінімальну кількість теплоти необхідно підвести до ємності, щоб у ній була лише пара. Зобразити процес у p,v -діаграмі та визначити тиск і температуру пари в кінці цього процесу.

Відповідь: $Q = 359,9$ МДж, $p = 2,16$ МПа, $t = 372,2^\circ\text{C}$.

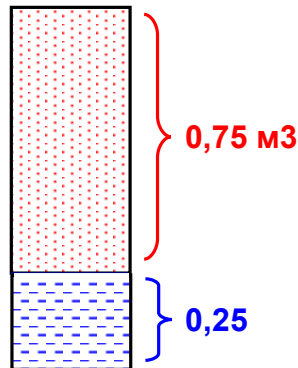


Рис. 6.4. До задачі 6.22

6.23. 1 кг води з тиском 10 бар та температурою 100°C нагрівається при постійному тиску до температури 300°C .

Визначити питомі величини теплоти, що йдуть:

- на нагрівання рідкої фази води від 100°C до стану насичення,
- процес пароутворення,
- процес перегріву пари.

Визначити також ступінь перегріву пари $\Delta t_p = t - t_n$.

Відповідь: а) $q'=342,9$ кДж/кг; б) $r=2014,4$ кДж/кг; в) $q_p=274,3$ кДж/кг;
 $\Delta t_p = 120,12$ К.

6.24. 1 кг водяної пари переходить при постійному тиску стану з $p_1=5$ бар і $s_1=6$ кДж/(кг·К) у стан з $t_2=200$ °С. Розрахувати цей процес, тобто. визначити q , ℓ , Δu , Δs , Δh . Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $q=461$ кДж/кг, $\ell=56$ кДж/кг, $\Delta u=405$ кДж/кг,
 $\Delta s=1,06$ кДж/(кг·К), $\Delta h=q=461$ кДж/кг.

6.25. Водяна пара з $p_1=100$ бар та $x_1=0,85$ ізобарно нагрівається до температури вище температури насичення на 150 °С. Визначити питому роботу зміни обсягу ℓ та зміна внутрішньої енергії Δu цього процесу.

Відповідь: $\ell=149$ кДж/кг, $\Delta u = 608$ кДж/кг.

6.26. До 1 кг води з початковими параметрами $p_1=10$ бар та $t_1= 50$ °С при постійному тиску підводиться 2000 кДж/кг теплоти. Визначити кінцеву температуру H_2O та питому роботу зміни обсягу. Зобразити процес у p,v -, T,s - і h,s -діаграмах.

Відповідь: $t_2=179,88$ °С, $x_2=0,718$, $\ell=139$ кДж/кг.

6.27. 1 кг водяної пари з початковими параметрами $p_1=5$ бар і $h_1=1840$ кДж/кг при постійному тиску отримує 710 кДж/кг теплоти. Визначити параметри пари в кінці процесу: t_2 , v_2 , h_2 , s_2 , і зміна його питомої внутрішньої енергії.

Відповідь: $t_2=151,85$ °С, $v_2=0,34$ м³/кг, $h_2=2550$ кДж/кг,
 $s_2=6,354$ кДж/(кг·К), $\Delta u=647$ кДж/кг.

6.28. $0,2$ м³ водяної пари з початковими параметрами $p_1=60$ бар та $t_1=430$ °С ізобарно стискається до зменшення об'єму в 5 разів. Визначити кінцевий фазовий стан H_2O та кількість теплоти даного процесу. Зобразити процес у p,v -, T,s - і h,s -діаграмах.

Відповідь: волога насичена пара з $x_2 = 0,28$, $Q = -6,36$ МДж.

6.29. Водяна пара з початковими параметрами $p_1=1,5$ МПа та $s_1=6$ кДж/(кг·К) ізотермічно розширюється до досягнення тиску $p_2=0,9$ бар. Розрахувати цей процес, тобто. визначити q , Δu , ℓ , Δs , Δh . Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $q=886,3$ кДж/кг, $\Delta u=251,5$ кДж/кг, $\ell=634,8$ кДж/кг,
 $\Delta s=1,88$ кДж/(кг·К), $\Delta h=291$ кДж/кг.

6.30. Визначити питому кількість теплоти та зміну внутрішньої енергії водяної пари при її ізотермічному розширенні від $p_1=10$ бар та $h_1=2500$ кДж/кг до $v_2=2$ м³/кг.

Відповідь: $q=806$ кДж/кг, $\Delta u=304$ кДж/кг.

6.31. Водяна пара з початковими параметрами $p_1=10$ бар та $x=0,9$ ізотермічно розширюється до кінцевого тиску $p_2=2$ бар. Визначити питому роботу зміни обсягу, теплоту та зміну внутрішньої енергії пари в даному процесі. Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $\ell=358$ кДж/кг, $q=580$ кДж/кг, $\Delta u=222$ кДж/кг.

6.32. Від 1 кг водяної пари при $p_1=1$ бар та $t_1=150$ °С при постійній температурі відводиться 1500 кДж/кг теплоти. Визначити кінцевий тиск та роботу зміни обсягу пари в даному процесі.

Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $p_2 = 4,76$ бар; $x_2 = 0,446$; $\ell=-408$ кДж/кг.

6.33. Водяна пара із стану з $p_1=2,5$ МПа і $t_1=300$ °С адіабатно переходить у стан з $h_2=2600$ кДж/кг.

Розрахувати цей процес, тобто. визначити q , ℓ , Δu , Δs , Δh . Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $q=0$, $\ell= -\Delta u=336,7$ кДж/кг, $\Delta s=0$, $\Delta h=-409$ кДж/кг.

6.34. У циліндрі з поршнем пароводяна суміш з початковими параметрами $p_1=2$ бар, $x_1=0,1$ стискається адіабатно до тиску $p_2=30$ бар. Визначити кінцевий фазовий стан H_2O та питому роботу зміни обсягу.

Відповідь: рідина, $\ell= -32,9$ кДж/кг.

6.35. Водяна пара з початковими параметрами $p_1=30$ бар та $t_1=300$ °С адіабатно розширюється до тиску $p_2=0,5$ бар. Визначити кінцеві параметри пари: t_2 , v_2 , h_2 , питома робота зміни обсягу та зміна ентальпії в цьому процесі. Схематично зобразити процес у p,v -, T,s - та h,s -діаграмах з нанесенням на них прикордонних ліній $x=0$ і $x=1$.

Відповідь: $x_2 = 0,838$, $t_2=81,35$ °С, $v_2=2,7$ м³/ кг, $h_2=2272$ кДж / кг;

$\ell =613,5$ кДж/кг, $\Delta h=-722$ кДж/кг.

6.36. 1 кг водяної пари з початковими параметрами $p_1=5$ бар і $x_1=0,88$ адіабатно стискається до стану насиченої сухої пари. Визначити кінцевий тиск, температуру та питому внутрішню енергії пари.

Відповідь: $p_2 = 27,5$ бар; $t_2 = 229$ ° С; $u_2 = 2600$ кДж/кг.

6.37. Водяна пара з початковими параметрами $p_1=15$ бар та питомих об'ємом $v_1=0,2$ м³/кг адіабатно розширюється до досягнення значення питомої внутрішньої енергії $u_2=2464,8$ кДж/кг. Визначити термічні параметри H_2O в кінцевому стані процесу: p_2 , t_2 , v_2 і пояснити найкоротший метод їх пошуку за таблицями [13].

Відповідь: $p_2=100$ кПа, $t_2=99,64$ °С, $v_2=1,66$ м³/кг.

6.38. Водяна пара при тиску 20 бар та ступеня сухості 0,8 спочатку нагрівається при постійному тиску до температури 420 °С, а потім при постійній температурі розширюється до тиску 1 бар. Зобразити цей процес у p,v -, T,s - і h,s -діаграмах і визначити його питому теплоту, роботу та зміну внутрішньої енергії.

Відповідь: $q=1850$ кДж/кг, $\ell=1110$ кДж/кг, $\Delta u=740$ кДж/кг.

6.39. Н₂О з параметрами $p_1=120$ бар та $h_1=428$ кДж/кг спочатку ізотермічно розширюється до питомого об'єму $v_2=1,4$ м³/кг, а потім адіабатно стискається до тиску $p_3=10$ бар. Відповідь: $\Delta u=u_3-u_1=2077$ кДж/кг.

6.40. 1кг водяної пари при тиску 20 бар та ступеня сухості 0,8 нагрівається при постійному тиску до температури 420 °С, потім при постійній температурі досягає тиску 8 бар, після чого при постійному обсязі його тиск змінюється до 7 бар, а далі пара адіабатно досягає тиску 0,1 бар. Зобразити цей процес 1-2-3-4-5-6-7-8 в p,v -, T,s - і h,s -діаграмах і визначити сумарну кількість його питомої теплоти, роботи зміни обсягу та зміни внутрішньої енергії.

Відповідь: $q=1042$ кДж/кг, $\Delta u=u_8-u_1=40$ кДж/кг, $\ell=1082$ кДж/кг.

6.41. Перебудувати процеси водяної пари (рис. 6.5) у відповідні p,v -, T,s - і h,s -діаграми, де будуть очевидні відповіді такі питання:

а) у якому з процесів p,v -діаграми (Рис. 6.5, а), що починаються в точці А, найбільша та найменша теплота і де найбільша та найменша ентальпії в кінці процесу ?

б) у якому з процесів T,s -діаграми (Рис. 6.5, б), що починаються в точці А, найбільша та найменша робота зміни обсягу і де найбільша та найменша ентальпії в кінці процесу ?

в) у якому з процесів h,s -діаграми (Рис. 6.5, в), що починаються в точці А, найбільші та найменші робота зміни обсягу та теплота ?

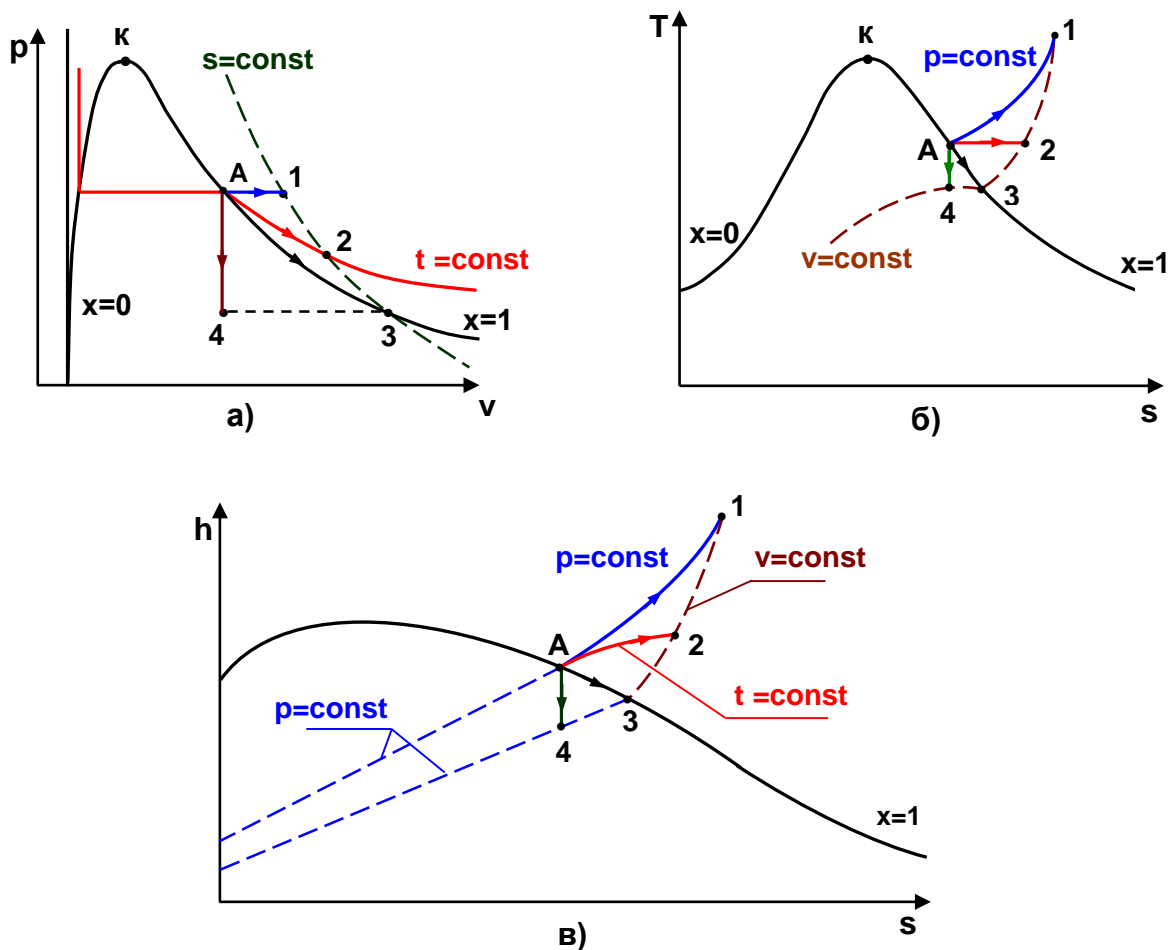


Рис. 6.5. Процеси водяної пари, що починаються в точці А:
а – у p,v -діаграмі, б – у T,s -діаграмі, в – у h,s -діаграмі

6.2. Контрольні питання

1. Чи може існувати насичена водяна пара з рідкою фазою води в ненасиченому стані, якщо так, то за яких умов?
2. Що означає поняття «суха насичена пара»?
3. Що означає поняття «рідка фаза води може насичення»?
4. Що означають поняття «перегріта пара» та «ступінь перегріву пари»?
5. Що означає поняття «волога насичена пара»?
6. Що таке ступінь сухості та вологість водяної пари і чому ці характеристики введені на додаток до термічних параметрів H_2O ?
7. Пояснити, якими величинами визначається характер ізобар води та водяної пари в T,s -діаграмі і як ізобари H_2O виглядають у різних фазових станах у T,s -діаграмі?
8. Пояснити, зміною якого параметра визначається характер ізобару води і водяної пари в h,s -діаграмі і як ізобари H_2O виглядають у різних фазових станах в h,s -діаграмі?

9. Пояснити, чому ізотерми та адіабати в області рідини p,v -діаграмі представляють практично вертикальні прямі?
10. Поясніть, чому ізобари в області рідини T,s -діаграмі практично збігаються з лінією $x = 0$?
11. Пояснити, чому ізотерми в області перегрітої пари h,s -діаграмі при малих тисках представляють практично горизонтальні прямі?
12. При якому тиску суха насичена водяна пара має максимальне значення питомої ентальпії?

7. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ

Вологе повітря – це суміш сухого повітря та водяної пари. У повітрі за певних умов крім водяної пари можуть бути його рідка (вода) або кристалічна (лід, сніг) фази. У природних умовах повітря завжди містить водяну пару.

Основні характеристики вологого повітря

Тиск вологого повітря дорівнює сумі парціальних тисків сухого повітря та водяної пари:

$$p = p_B + p_p \quad (7.1)$$

Для наочності представлення основних характеристик вологого повітря покажемо в p, v -діаграмі (рис.7.1) стану водяної пари у вологому повітрі. Як визначальні параметри водяної пари у вологому повітрі використовуються температура повітря t і парціальний тиск водяної пари p_p .

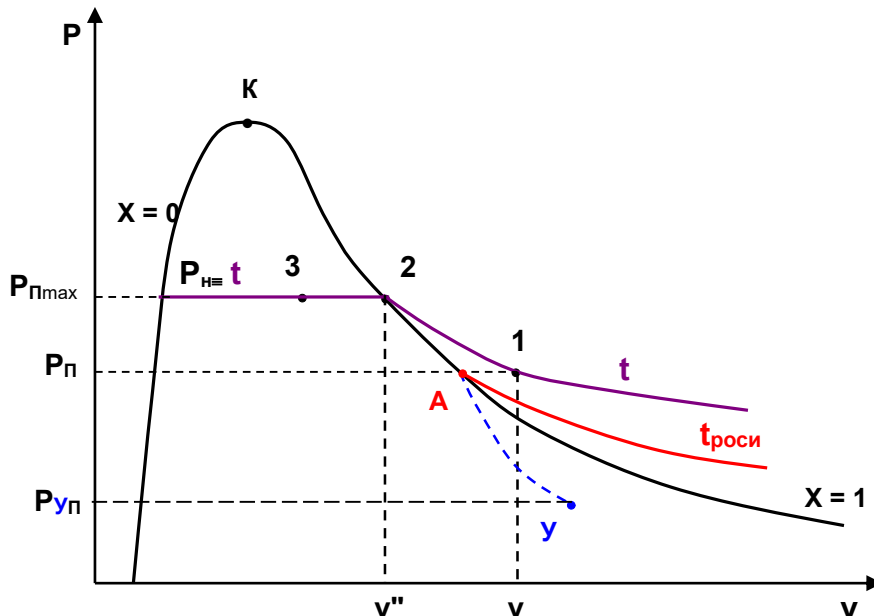


Рис.7.1. Основні стани та характеристики водяної пари у вологому повітрі в p, v -діаграмі

Водяна пара у вологому повітрі може перебувати в трьох станах (рис.7.1): точка 1 – перегріта пара, точка 2 – суха насичена пара, точка 3 – волога насичена пара (суха насичена пара плюс крапельки рідини в стані насичення). Вищою межею парціального тиску водяної пари при даній температурі повітря t є тиск насичення пари $p_{пmax}=p_n$.

Абсолютна вологість ρ – це масова кількість водяної пари в одному кубічному метрі вологого повітря. Її розмірність – $\text{кг}/\text{м}^3$. Для визначення абсолютної вологості використовується величина, обернена питомим обсягом водяної пари $v=f(p_p, t)$,

$$\rho = \frac{m_{\text{п}}}{V} = \frac{1}{v} . \quad (7.2)$$

Відносна вологість φ – це відношення абсолютної вологості до максимально можливої вологості повітря за даної температури:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{max}}} = \frac{\rho}{\rho''} = \frac{v''}{v} , \quad (7.3)$$

Де $\rho_{\text{max}}=\rho''$ і v'' – максимальна абсолютна вологість повітря та питомий об'єм сухої насиченої водяної пари при даній температурі t (точка 2 в p, v -діаграмі рис.7.1).

Відповідно до H_2O області вологої насиченої пари при температурі повітря t (точка 3), вміст водяної пари в 1 м^3 повітря такий же, як і в точці 2 p, v -діаграми H_2O ($v = v''$), але в повітрі крім водяної пари присутні крапельки води у стані насичення.

Розрізняють 3 стани вологого повітря:

1. Ненасичене вологе повітря – $\varphi < 100\%$, $p_{\text{п}} < p_{\text{н}}$, $\rho < \rho''$, водяна пара у вологому повітрі знаходиться у вигляді перегрітої пари (точка 1);
2. Насичене вологе повітря – $\varphi = 100\%$, $p_{\text{п}} = p_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$, водяна пара у вологому повітрі знаходиться у вигляді сухої насиченої пари (точка 2);
3. Перенасичене вологе повітря – $\varphi = 100\%$, $p_{\text{п}} = p_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$, крім сухої насиченої пари в повітрі знаходяться крапельки води в стані насичення або льоду, снігу (точка 3 за наявності крапельок води).

У техніці використовується така характеристика вологого повітря як температура точки роси. Це така температура, починаючи з якої при охолодженні вологого повітря за постійного тиску (процесу 1-А, рис. 7.1) з нього починається випадання крапельок води, тобто. температурі точки роси відповідає температура насичення при парціальному тиску водяної пари (точка А). При зниженні температури повітря нижче температури точки роси при постійному тиску всієї суміші та постійному вмісті в ній H_2O (процес А-В) парціальний тиск водяної пари зменшується ($p_{\text{вп}} < p_{\text{п}}$), кількість насиченої сухої пари зменшується, а кількість крапель води збільшується.

Вологовміст d - це маса H_2O в грамах, що знаходиться в 1кг сухого повітря. У загальному випадку поняття "вологовміст" відноситься не тільки до парової фази води, але і до рідкої, і до твердої її фаз. Розрахунковий вираз для вмісту вологи в повітрі (г/кг с.п.) виходить із співвідношення

$$d = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{с.в.}}} 1000 . \quad (7.4)$$

Питома ентальпія вологого повітря H розраховується на 1 кг сухого повітря (кДж/(кг с.п.)) та визначається як сума ентальпій компонентів, що знаходяться в 1 кг сухого повітря:

$$H = h_B + \frac{d_p}{1000} h_p + \frac{d_{ж}}{1000} h_{ж} + \frac{d_T}{1000} h_T, \quad (7.5)$$

де d_p, d_r, d_T – кількість пари, рідини та твердої фази H_2O (лід, сніг) у грамах на 1 кг сухого повітря (вологівмісту);

h_c, h_p, h_r, h_T – питомі ентальпії сухого повітря, пари, рідини та твердої фази H_2O , кДж/кг.

У виразі (7.5) ентальпії всіх компонентів вологого повітря повинні мати однаковий тиск і температуру початку їхнього відліку.

Характеристики атмосферного вологого повітря

За температури атмосферного повітря $0 \div 50$ °С парціальний тиск водяної пари дуже мало ($0,006 \div 0,07$ бар), що дозволяє застосувати до перегрітої та сухої насиченої водяної пари рівняння ідеального газу

$$p_p v = R_{H_2O} T, \quad (7.6)$$

$$p_H v'' = R_{H_2O} T, \quad (7.7)$$

де p_p, p_H – парціальний тиск для перегрітої та сухої насиченої водяної пари при температурі T ;

v, v'' – питомі обсяги для перегрітої та сухої насиченої водяної пари при температурі T .

Розділивши вирази (7.6) і (7.7) один на одного, отримаємо розрахунковий вираз відносної вологості повітря через парціальний тиск водяної пари:

$$\varphi = \frac{v''}{v} = \frac{p_p}{p_H}. \quad (7.8)$$

Молярну масу вологого атмосферного повітря визначають за рівнянням молярної маси суміші ідеальних газів

$$\mu = 28,96 - 10,944 \frac{p_p}{p}. \quad (7.9)$$

Розрахунковий вираз для вмісту вологи парової фази води в атмосферному повітрі, г/(кг с.п.), матиме вигляд

$$d_p = \frac{m_p}{m_{с.в.}} 1000 = 622 \frac{p_p}{p - p_p} = 622 \frac{\varphi p_H}{p - \varphi p_H}. \quad (7.10)$$

Розрахунковий вираз ентальпії вологого атмосферного повітря, кДж/(кг с.п.), має вигляд

$$H = t + \frac{d_p}{1000} (2501 + 1,93 \cdot t) + \frac{d_{ж}}{1000} 4,187 \cdot t + \frac{d_T}{1000} (-335 + 2,1 \cdot t) \quad (7.11)$$

Н,d- діаграма атмосферного вологого повітря

Для спрощення визначення параметрів атмосферного вологого повітря використовують Н,d діаграму вологого повітря (рис. 7.2).

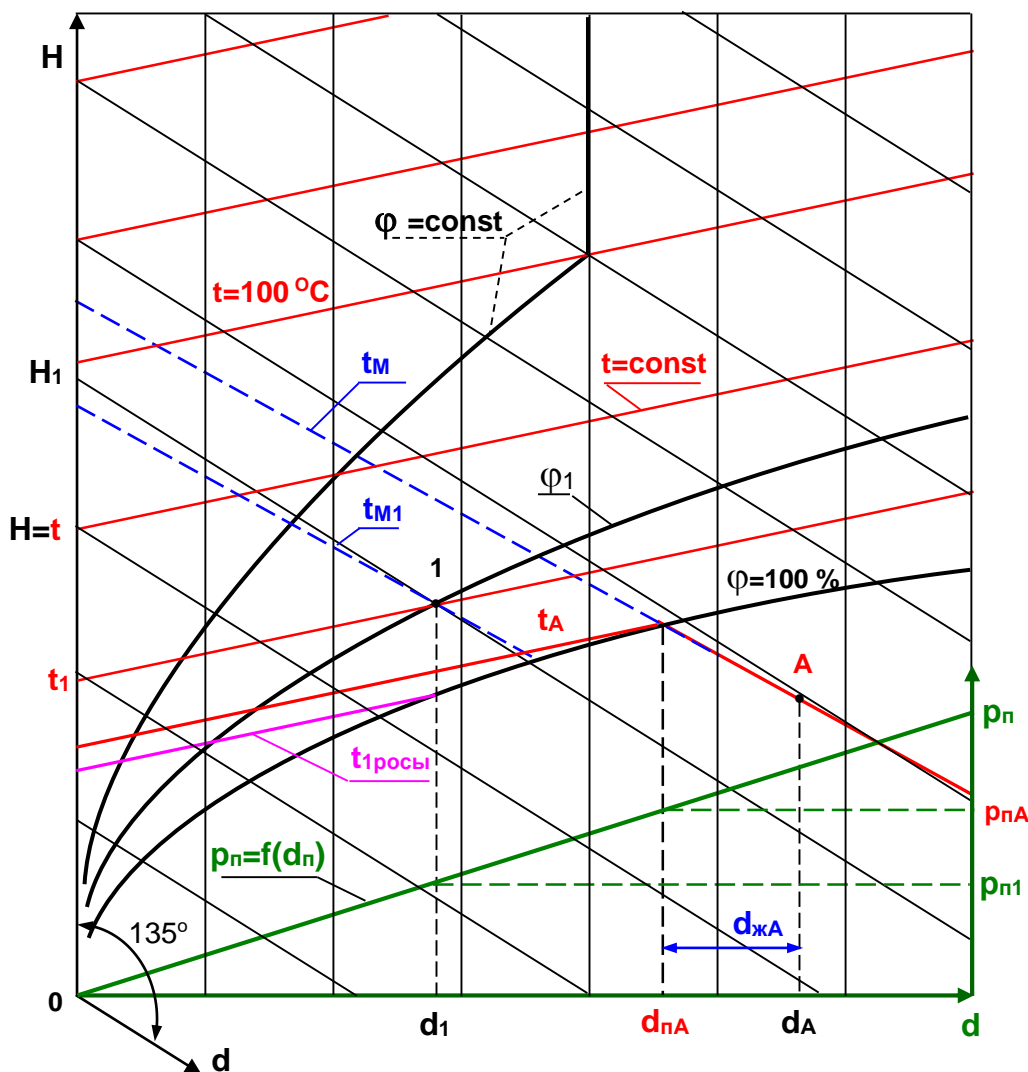


Рис. 7.2. Н,d-діаграма вологого атмосферного повітря та приклади визначення параметрів за нею

Вона будується для постійного тиску повітря (зазвичай $p=745$ мм рт.ст.), але оскільки парціальний тиск водяної пари на кілька порядків менше тиску вологого повітря, а атмосферний тиск змінюється в невеликих межах, то з достатньою для інженерних розрахунків ступенем точності такою діаграмою можна користуватися і за інших атмосферних тисків повітря.

Побудова Н,d- діаграми вологого повітря ґрунтується на розрахунковому вираженні ентальпії вологого атмосферного повітря (7.11).

Н,d-діаграму виконують у косокутній системі координат, як правило, з кутом між осями Н і d в 135° (рис. 7.2). Це дозволяє збільшити порівняно з прямокутною системою координат відстань між ізотермами та лініями інших характеристик ненасиченого вологого повітря Н,d-діаграмі.

Вісь координат вмісту вологи d має нульове початок. Вертикальні лінії

H,d- діаграмі є лінії постійних вологовмістів $d=\text{const}$. Лінії постійних ентальпій $H=\text{const}$ паралельні осі d і йдуть під кутом 135° до осі H .

1) Область вологого ненасиченого повітря H,d-діаграми

Для вологого ненасиченого повітря в H,d-діаграмі (область вище лінії $\varphi=100\%$) зображення ізотерм $t=\text{const}$ ведеться відповідно до рівняння ентальпії для цієї області, коли в повітрі може бути тільки парова фаза води:

$$H = t + \frac{d_{\text{п}}}{1000} (2501 + 1,93 \cdot t)$$

Ізотерми в цій галузі являють собою близькі до паралельних прямих ліній з кутовим коефіцієнтом, що відповідає величині

$$\left(\frac{\partial H}{\partial d} \right)_t = \frac{2501 + 1,93 \cdot t}{1000}$$

Незначна віялова розбіжність ізотерм викликана доданком $1,93t$.

При $d=0$ отримуємо $H=t$, тобто. чисельні значення ентальпій та температур на осі H однакові. Тому вісь ентальпій одночасно виконує роль осі температур.

Кожній точці ізотерми відповідає певне значення відносної вологості повітря φ . Поєднавши на ізотермах точки з однаковими φ одержують лінії постійних відносних вологостей повітря ($\varphi=\text{const}$). При цьому $\varphi=0$ відповідає $d=0$, тобто. Лінія $\varphi=0$ збігається з віссю ентальпій H .

Лінії $\varphi=\text{const}$ вище ізотерми 100°C є вертикальні прямі. У цій галузі температур ($t \geq 100^\circ\text{C}$) тиск насичення водяної пари стає рівним атмосферному тиску і не може змінюватися ($p_{\text{н}}=p=\text{const}$). Відповідно, не змінюється при $\varphi=\text{const}$ у цій галузі та вологовміст повітря

$$d_{\text{п}} = 622 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{p - \varphi p_{\text{н}}} = 622 \frac{\varphi}{1 - \varphi} = \text{const}$$

Для повноти інформації про вологому повітрі на H,d-діаграму накладається прямокутна діаграма $p_{\text{н}}=f(d)$, що відображає залежність парціального тиску водяної пари від вмісту води водяної пари в повітрі $d=622p_{\text{н}}/(p-p_{\text{н}})$.

2) Область перенасиченого вологого повітря H,d-діаграми

В області перенасиченого вологого повітря (її називають областю туману, вона розташована в H,d-діаграмі нижче лінії $\varphi=100\%$) крім парової фази в повітрі може бути рідка або тверда фаза води. При атмосферному тиску повітря та температурі вище 0°C можуть одночасно існувати тільки парова та рідка фази води, а при температурах нижче 0°C – тільки парова та тверда (лід, сніг) фази води, і тільки при 0°C можуть одночасно існувати всі три

фази води .

Характер ізотерм в області перенасиченого вологого повітря H,d -діаграми при температурах більше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ визначається рівнянням ентальпії вологого повітря у вигляді

$$H = t + \frac{d_{\text{п}}}{1000} (2501 + 1,93 \cdot t) + \frac{d_{\text{ж}}}{1000} 4,187 \cdot t$$

Кількість водяної пари в області туману вологого повітря за постійної температури не змінюється. Воно відповідає максимально можливому вмісту води в повітрі при даній температурі і визначається в H,d -діаграмі на лінії $\varphi=100\%$ як вміст вологи вміст насиченого повітря $d_{\text{пА}}=d_{\text{нА}}$ (рис.7.2, точка А). Збільшення вмісту вологи повітря на ізотермі в області туману обумовлено збільшенням рідкої фази води в повітрі. Парціальний тиск водяної пари на ізотермі в області туману при цьому залишається постійним і рівним тиску насичення ($p_{\text{пА}} = p_{\text{нА}}$). Таким чином, у вираженні ентальпії перенасиченого вологого повітря при $t=\text{const}$ змінної буде тільки третій доданок, що визначає кут нахилу ізотерми в області туману H,d -діаграми виразом

$$\left(\frac{\partial H}{\partial d_{\text{ж}}} \right)_t = \frac{4,187 \cdot t}{1000}$$

Кутовий коефіцієнт для ізотерми ненасиченого вологого повітря більше за цей кутовий коефіцієнт, тобто. на лінії $\varphi=100\%$ прямолінійна ізотерма зазнає зламу, зменшуючи кут нахилу до осі d області туману.

Менший кут нахилу ізотерм в області туману буде відповідати меншому значенню температури, а ізотерма $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ у цій галузі за наявності в повітрі тільки парової та рідкої фаз води збігається з лінією постійних ентальпій – паралельна осі d .

Визначення вмісту вологи вмісту рідкої фази води в повітрі в області туману виконується знаходженням різниці загального вмісту вологи і вологовмісту парової фази води ($d_{\text{рА}}=d_{\text{А}}-d_{\text{пА}}$).

Насправді визначення параметрів вологого повітря використовується психрометр, у H,d -діаграмі показані ізотерми мокрого термометра психрометра. Ці ізотерми в H,d -діаграмі будують шляхом продовження ізотерм з області туману в область ненасиченого вологого повітря (вище лінії $\varphi=100\%$) у вигляді прямих пунктирних (умовних) ліній. рис.7.2, точка 1).

3) Приклад користування H,d -діаграмою

При відомих температурах сухого t_1 і мокрого $t_{\text{м1}}$ термометрів, взятих зі свідчень психрометра, визначаємо на перетині цих ізотерм H,d -діаграмі точку 1, відповідну стану вологого повітря (див. рис.7.2). По осях координат діаграми знаходимо H_1 і d_1 і лінію, що проходить через точку 1 $\varphi_1=\text{const}$. На перетині ліній $d_1=\text{const}$ та $\varphi_1=100\%$ визначається температура точки роси t_1

роси, а залежно від $p_p=f(d)$ і d_1 знаходиться парціальний тиск пари $p_{п1}$.

Якщо точка А (див. рис.7.2) розташовується в області перенасиченого вологого повітря і ми знаємо її температуру, то визначити вміст вологи в ній можна тільки експериментально. Вологовміст пари в цій точці відповідає величині $d_{нА}$, що перебуває на перетині ліній t_A і $\varphi=100\%$ Вологовміст рідкої фази води у цій точці визначається як різницю вологовмістів $d_{рА}=d_A-d_{пА}$. Парціальний тиск пари для точки А дорівнює тиску насичення: $p_A=p_{пА}$ при t_A та $\varphi=100\%$. Діаграма H,d для вологого атмосферного повітря, побудована при тиску повітря 745 мм рт.ст., наведена на рис.

7.1. Задачі

Приклад розв'язання задачі:

7.1.атмосферне повітря має температуру 40 оС і тиск 750 мм рт. ст., парціальний тиск водяної пари у повітрі 30 мм рт. ст.

Визначити аналітично (не використовуючи діаграму H,d) стан та основні характеристики вологого атмосферного повітря: абсолютну вологість, відносну вологість, температуру точки роси, вміст вологи, питому ентальпію.

Рішення

За таблицями термодинамічних властивостей води та водяної пари (3.1-3.2) визначається фазовий стан водяної пари в повітрі, за яким оцінюється стан вологого повітря:

при $p_p = 30$ мм рт. ст. $= \frac{30}{750} 10^5 = 4 \cdot 10^3$ Па і $t=40$ °С фазовий стан H_2O –

перегріта водяна пара, що відповідає ненасиченому вологому повітрі.

Абсолютна вологість повітря може бути розрахована з використанням таблиць [13] та за рівнянням стану ідеального газу:

при $p_p=4$ кПа та $t=40$ °С за таблицями 3.1-3.2 визначається питомий обсяг водяної пари $v=36,08$ м³/кг та розраховується ρ

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{36,08} = 0,0277 \text{ кг/м}^3;$$

або, якщо використовувати рівняння стану ідеального газу,

$$\rho = \frac{p_p}{R_{H_2O} T} = \frac{18 \cdot 4 \cdot 10^3}{8314 \cdot (40 + 273)} = 0,02766 \text{ кг/м}^3.$$

Відносну вологість також визначимо двома способами:

при $t=40$ °С за таблицями 3.1-3.2 визначається питомий обсяг сухої насиченої водяної пари $v''=19,548$ м³/кг і розраховується відносна вологість повітря:

$$\varphi = \frac{\rho''}{\rho} = \frac{v''}{v} = \frac{19,548}{36,08} = 0,542 ;$$

використовуючи рівняння стану ідеального газу, відносну вологість повітря розраховуємо як відношення парціальних тисків пари

$$\varphi = \frac{v''}{v} = \frac{p_p}{p_n} = \frac{4}{7,375} = 0,542 ,$$

де $p_n = 7,375$ кПа - тиск насичення водяної пари при $t=40$ °С.

Збіжність результатів розрахунку величин ρ і φ з обох методів очевидна.

Температура точки роси визначається за таблицями 3.1-3.2, як температура насичення водяної пари при її парціальному тиску $p_p=4$ кПа:

$$t_{\text{росы}} = t_n(p_p) = 28,98 \text{ } ^\circ\text{З.}$$

Вологовміст повітря визначається за рівнянням (7.10):

$$d_p = 622 \frac{p_p}{p - p_p} = 622 \frac{4}{100 - 4} = 25,9 \text{ г/(кг с.п.).}$$

Питома ентальпія вологого повітря розраховується за формулою (7.11) стосовно ненасиченого повітря:

$$\begin{aligned} H &= t + \frac{d_p}{1000} (2501 + 1,93t) = \\ &= 40 + \frac{25,9}{1000} (2501 + 1,93 \cdot 40) = 106,8 \text{ кДж/(кг с.п.).} \end{aligned}$$

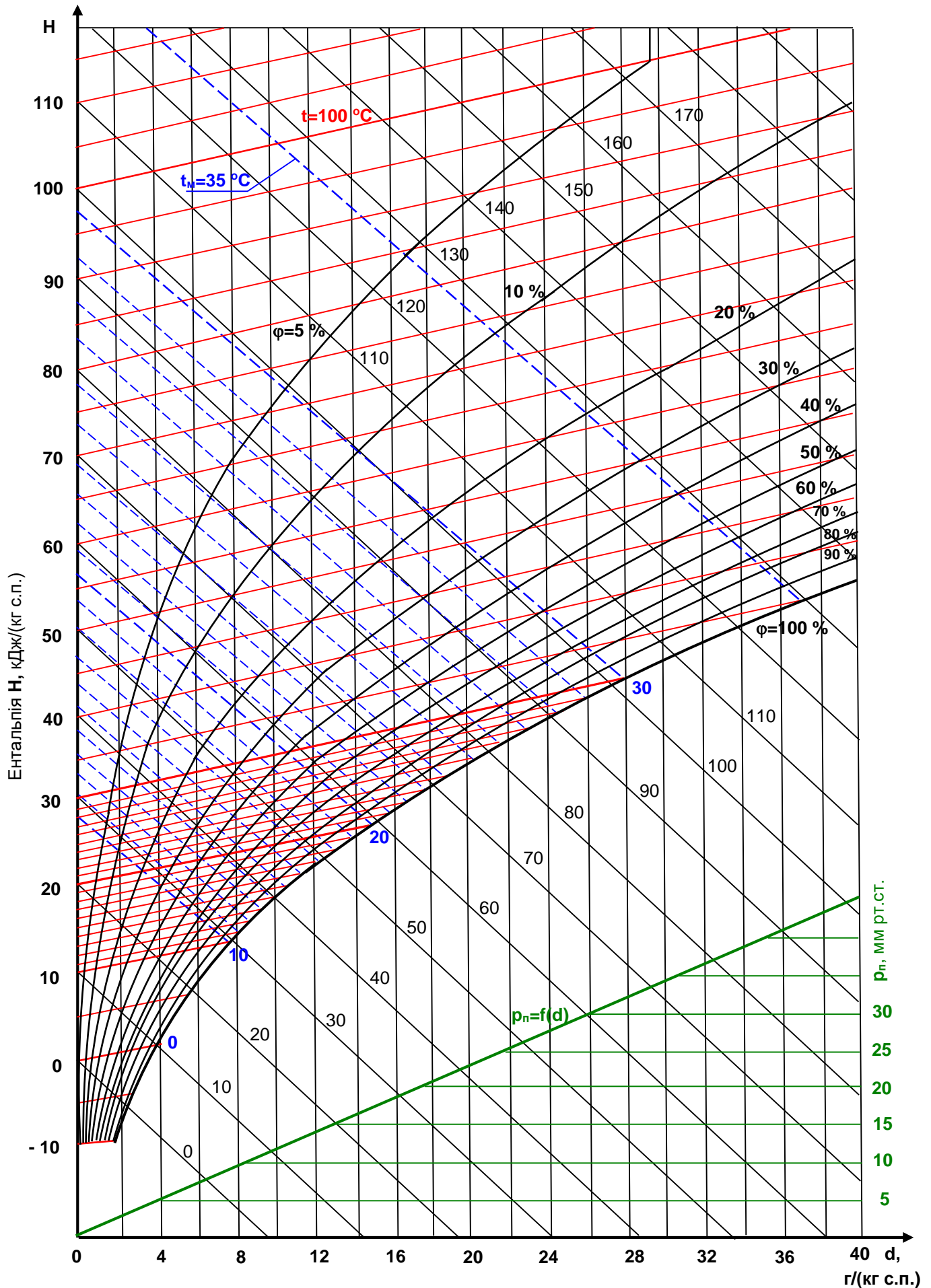


Рис. 7.3. H, d - діаграма волого атмосферного повітря при $V=745$ мм рт.ст.

7.2. Вологе атмосферне повітря має температуру 50 °С і тиск 1 бар, парціальний тиск водяної пари в повітрі становить 0,04 бар. Визначити абсолютну і відносну вологість повітря, вміст води, питому ентальпію і температуру точки роси.

Відповідь: $\rho=0,0268$ кг/м³, $\varphi=2\%$; $d=26,2$ г/(кг с.в.)

$H = 118$ кДж / (кг с.п.), $t_{\text{роси}} = 29,2^{\circ}\text{С}$.

7.3. Стан вологого повітря задан параметрами: $p=1$ бар, $t=25$ °С, $\varphi=0,6$. За допомогою таблиць термодинамічних властивостей водяної пари визначити парціальний тиск водяної пари в повітрі.

Відповідь: $p_{\text{п}} = 1,9$ кПа.

7.4. Атмосферне повітря при тиску 1 бар має температуру 20 °С та відносну вологість $\varphi=90\%$. Визначити характеристики вологого атмосферного повітря ρ , d , $p_{\text{п}}$, $t_{\text{роси}}$, H аналітично (розрахунковим шляхом), використовуючи H,d -діаграму вологого атмосферного повітря.

Відповідь: $\rho=0,0156$ кг/м³, $d=13,3$ г/(кг с.п.), $p_{\text{п}}=2,1$ кПа.

$t_{\text{роси}} = 18,4$ °С, $H = 53,8$ кДж / (кг с.п.).

7.5. Стан вологого атмосферного повітря при $p=1$ бар та $t=20$ °С характеризується температурою точки роси $t_{\text{роси}}=10$ °С.

Визначити абсолютну ρ та відносну вологість φ , вміст води d і питому ентальпію H вологого повітря в цьому стані.

Відповідь: $\rho=4,93 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $\varphi=52,5\%$, $d=7,73$ г/(кг с.п.),

$H=39,6$ кДж/(кг с.п.).

7.6. Використовуючи H,d -діаграму, визначити основні характеристики атмосферного вологого повітря φ , d , $p_{\text{п}}$, $t_{\text{роси}}$, H при тиску=745 мм рт.ст. і температурах сухого та мокрого термометрів психрометра $t=30$ °С, $t_{\text{м}}=20$ °С.

Відповідь: $\varphi=40\%$, $d=10,7$ г/(кг с.в.), $p_{\text{п}}=12,5$ мм рт.ст., $t_{\text{роси}}=15,5$ °С,

$H=57$ кДж/(кг с.п.).

7.7. Для визначення стану вологого атмосферного повітря застосовано психрометр, сухий термометр якого показує 40°С, а вологий – 35°С. Визначити характеристики атмосферного вологого повітря: φ , d , $p_{\text{п}}$, $t_{\text{роси}}$, H , використовуючи діаграму H,d вологого повітря.

Відповідь: $\varphi=75\%$, $d=35$ г/(кг с.п.), $p_{\text{п}}=39$ мм рт.ст.

$t_{\text{роси}}=34$ °С, $H=130$ кДж/(кг с.п.).

7.8. Визначити за H,d -діаграмою характеристики вологого атмосферного повітря φ , $d_{\text{р}}$, $p_{\text{п}}$, $t_{\text{роси}}$, H при тиску 745 мм рт. ст., температурі 20 °С і вміст води $d=18$ г/кг с.п.

Відповідь: $\varphi=100\%$, $d_{\text{р}}=3,5$ г/(кг с.п.), $p_{\text{п}}=17$ мм рт.

троси = 23,5 оС, Н = 58 кДж / (кг с.в.).

7.9. Визначити відносну вологість атмосферного повітря, що має тиск 745 мм рт. ст., температуру 110 °С і вміст вологи 18г/(кг с.п.).

Відповідь: $\varphi=2,81\%$.

7.10. Визначити питому ентальпію вологого атмосферного повітря, якщо його тиск $p=750$ мм рт.ст., температура $t=25$ °С, а відносна вологість $\varphi=80\%$. У розрахунках використовувати таблиці 3.1-3.2 термодинамічних властивостей води та водяної пари.

Відповідь: $H = 66,2$ кДж / (кг с.п.).

7.11. Вологе атмосферне повітря при температурі $t=20$ °С та тиску $p=750$ мм рт.ст. має відносну вологість $\varphi=70\%$. Використовуючи таблиці 3.1-3.2 теплофізичних властивостей води та водяної пари, визначити кількість теплоти, яку необхідно ізобарно підвести до 1 кг с.п. при постійному його вмісті вологи для зниження відносної вологості повітря до 10 %.

Відповідь: $Q = 36,5$ кДж / (кг с.п.).

7.12. Атмосферне повітря при $t_1=70$ °С, $p=750$ мм рт. та відносної вологості $\varphi_1=6$ % надходить у сушильну камеру. Після сушіння матеріалу його температура стала $t_2=30$ °С, а відносна вологість $\varphi_2=90\%$. Використовуючи таблиці 3.1-3.2 теплофізичних властивостей води та водяної пари, визначити, скільки води випаровував 1 кг сухого повітря та скільки теплоти втрачено їм.

Відповідь: $\Delta d=12,8$ г/(кг с.п.), $Q=8,1$ кДж/(кг с.п.).

7.13. Визначити мінімальну масову кількість вологого повітря з параметрами: $t=20$ °С, $p=1$ бар, $\varphi=80$ %, необхідне випаровування 1 кг води з температурою 20 °С. Вважати, що при випаровуванні води теплообміну з довкіллям немає. Рішення виконати двома способами:

1) з використанням Н,d-діаграми;

2) з використанням таблиць 3.1-3.2 термодинамічних властивостей води та водяної пари.

Відповідь: $G_{в.л.в}=1190$ кг.

7.14. В експериментальній сушильній установці (рис. 7.4) вологе повітря з початковими параметрами $t_1=20$ °С і $\varphi_1=40$ % нагрівається калорифером до температури $t_2=80$ °С, а потім за рахунок випаровування матеріалу вологи його температура знижується до $t_3=35$ °С. Розрахувати кількість теплоти, витрачену в установці на випаровування з матеріалу 1 кг води, параметри повітря на виході з установки (H_3 , d_3 , φ_3) та кількість вологи, яка випаровується в установці з матеріалу з розрахунку на 1 кг сухого повітря. Вважати, що теплові втрати в установці відсутні, а матеріал для сушіння, що знаходиться в установці, попередньо був нагрітий до 80 °С.

Відповідь: $Q=3410$ кДж/(кг исп.води), $\varphi_3=65\%$, $H_3=95,6$ кДж/(кг с.п.),
 $d_3=23,7$ г/(кг с.п.), $d_3-d_2=17,8$ г/(кг с.п.).

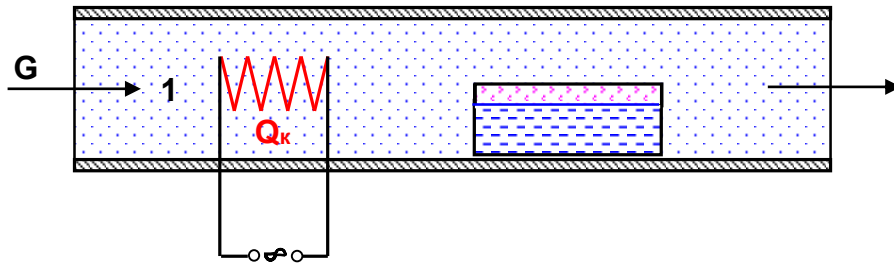


Рис. 7.4. Схема сушильної установки:
 G - Витрата повітря; Q_k – теплота калорифера

7.15. Розрахувати процес сушіння матеріалу атмосферним повітрям (Рис. 7.4) з тиском 745 мм рт. ст. Повітря спочатку нагрівається в калорифері від $t_1=20$ °С і $\varphi_1=70\%$ до $t_2=90$ °С, а потім надходить у сушильну камеру, де йде сушіння з втратами теплоти в навколишнє середовище до $t_3=35$ °С та $t_{3м}=27$ °С (температура мокрого термометра психрометра).

Визначити:

- 4) параметри повітря H і d у точках 1, 2, 3 установки по H, d - діаграмі;
- 5) кількість випареної вологи 1 кг сухого повітря в установці;
- 6) кількість сухого повітря, необхідного для випаровування 1 кг вологи з матеріалу в установці;
- 7) кількість теплоти, отримане повітрям у калорифері при випаровуванні ним 1 кг вологи,
- 8) кількість втрат теплоти у сушильній камері при випаровуванні повітрям 1 кг вологи;
- 9) мінімально-теоретична кількість сухого повітря, необхідна для випаровування 1 кг вологи з матеріалу у цій установці без калориферу.

Відповідь: $d_1=d_2=10,1$ г/(кг с.п.), $d_3=19,9$ г/(кг с.п.), $H_1=47$ кДж/(кг с.п.),
 $H_2=115$ кДж/(кг с.п.), $H_3=86$ кДж/(кг с.п.);
 $d_3-d_2=9,8$ г/(кг с.п.), $G_{св} = 102$ (кг с.п.)/(Кг і сп.води);
 $Q_k = 6936$ кДж/(Кг і сп.води), $Q_{пот.} = 2958$ кДж/(Кг і сп.води);
 $G_{св \min} = 588$ (кг с.п.)/(Кг і сп.води).

7.16. У сушильну камеру повітря надходить з $t_1=80$ °С і $\varphi_1=0,05$. З сушильної камери він виходить з $t_2=55$ °С і вмістом вологи $d_2=105$ г/(кг с.п.). Визначити аналітично, використовуючи таблиці термодинамічних властивостей водяної пари, відносну вологість φ_2 на виході з сушарки та кількість вологи, що виноситься з сушарки 1кг сухого повітря. Прийняти тиск у сушильній камері постійним та рівним 750 мм рт.ст.

Відповідь: $\varphi_2=0,918$, $\Delta d=89,9$ г/(кг с.п.).

7.17. Початковий стан вологого атмосферного повітря встановлено параметрами:

$p_1=1$ бар, $t_1=40$ °С, $\varphi_1=60\%$. Повітря ізобарно без зміни вмісту H_2O охолоджується до температури $t_2=20$ °С. Визначити, скільки вологи у вигляді роси випаде з повітря з розрахунку на 1 кг сухого повітря.

Відповідь: $d_p = 24$ г / (кг с.п.).

7.18. Вологе повітря при барометричному тиску 750 мм рт.ст. та температурі 90 °С має відносну вологість $\varphi_1= 80\%$. Повітря ізобарно без зміни вмісту у ньому H_2O охолоджується до температури $t_2=10$ °С. Визначити, яка частка водяної пари перетворюється на рідину, використовуючи таблиці 3.1-3.2 термодинамічних властивостей водяної пари.

Відповідь: 99,03%.

7.19. Вологе повітря з температурою 20 °С та тиском 1 бар має відносну вологість 80 %. Визначити, яка кількість рідини випаде з розрахунку на 1 кг сухого повітря при ізобарному охолодженні вологого повітря до 10 °С. Визначити абсолютну вологість повітря в кінцевому стані та ступінь сухості водяної пари в цьому повітрі. Показати процес охолодження водяної пари в повітрі в p, v -діаграмі.

Відповідь: $d_p = 4,12$ г/(кг с.п.), $\rho_2=9,397 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $x_2=0,652$.

7.20. Насичене вологе атмосферне повітря ($\varphi_1= 100\%$) при $t_1 = 20$ °С і $p = 750$ мм рт.ст. надходить у сушильну камеру. Після «сушіння» матеріалу шляхом винесення з нього крапельної вологи вміст вологи вміст збільшився до 24 г/(кг с.п.). Використовуючи таблиці теплофізичних властивостей води та водяної пари 3.1-3.2, визначити, скільки води видалив 1 кг сухого повітря і на скільки змінилася його ентальпія в цьому процесі. Вважати процес сушіння ідеальним, без втрат теплоти в довкілля і витрат теплоти на нагрівання об'єктів в сушильній камері ($t_2=20$ °С).

Відповідь: $\Delta d=9,14$ г/(кг с.п.), $\Delta H=0,768$ кДж/(кг с.п.).

7.2. Контрольні питання

1. Дайте визначення парціального тиску водяної пари у вологому повітрі.
2. Дайте визначення та розрахунковий вираз абсолютної вологості повітря, поясніть, які припущення робляться для вологого атмосферного повітря та яку формулу при цьому використовують для розрахунку його абсолютної вологості.
3. Дайте визначення та розрахунковий вираз відносної вологості повітря, поясніть, яку формулу використовують для розрахунку відносної вологості атмосферного повітря.
4. Назвіть основні стани вологого повітря та параметри та характеристики вологого повітря, що відповідають цим станам. Покажіть стан водяної пари в цьому повітрі в p, v -діаграмі.

5. Дайте визначення температури точки роси вологого повітря та покажіть цю ізотерму в p, v -діаграмі для водяної пари. Поясніть практичне значення температури точки роси.
6. Дайте визначення вологовмісту повітря та наведіть розрахунковий вираз вологовмісту пари для атмосферного вологого повітря.
7. Напишіть розрахунковий вираз ентальпії вологого повітря за наявності в ньому парової, рідкої та твердої фаз води. Поясніть, які вимоги пред'являються до питомих ентальпій, що входять до цього рівняння.
8. Напишіть розрахунковий вираз ентальпії для вологого атмосферного повітря за наявності в ньому парової, рідкої та твердої фаз води. Поясніть, які припущення прийнято при отриманні розрахункових виразів питомих ентальпій, що входять до цього рівняння.
9. Поясніть принцип роботи психрометра та його практичне призначення.
10. Поясніть принцип побудови ізотерм у сфері ненасиченого вологого повітря в H, d -діаграмі.
11. Поясніть принцип побудови ліній постійних відносних вологостей для вологого атмосферного повітря в H, d -діаграмі.
12. Поясніть принцип побудови ізотерм в області перенасиченого вологого повітря та ізотерм вологого термометра психрометра в області ненасиченого повітря в H, d -діаграмі.
13. Поясніть особливість ліній постійних відносних вологостей атмосферного повітря за температур більше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
14. На підставі якого виразу будується залежність парціального тиску пари від вмісту вологи в H, d -діаграмі?
15. Поясніть призначення калорифера в сушильній установці.
16. Чому процес ідеального сушіння відбувається за постійної ентальпії?
17. Як визначається парціальний тиск пари в області перенасиченого вологого повітря в H, d -діаграмі?
18. Як визначається температура точки роси в області перенасиченого вологого повітря в H, d -діаграмі?
19. Як визначаються вміст вологи вмісту парової та рідкої фаз води в області перенасиченого вологого повітря в H, d -діаграмі?

8. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Другий закон термодинаміки так само, як і перший, не має жодних доказів, окрім людського досвіду у земних умовах. Якщо перший закон термодинаміки кількісно характеризує термодинамічні процеси, другий закон термодинаміки дає якісну їх оцінку. Він відповідає на питання, в якому напрямку і до якої межі може йти той чи інший процес, за яких умов можливе перетворення теплоти в роботу, що необхідне передачі теплоти від холодного тіла до гарячого, що характеризує реальні процеси тощо.

Оскільки в природі відбувається безліч термодинамічних процесів, то єдиного формулювання другого закону термодинаміки не може бути. Однак до кожного класу цих процесів можна дати своє трактування другого закону термодинаміки.

Другий закон термодинаміки дає як якісну, а й кількісну оцінку процесів, використовуючи таку характеристику, як зміна ентропії тіла чи системи.

Математичний запис другого закону термодинаміки для тіла може бути представлений виразом

$$\delta q = T ds \quad (8.1)$$

Відповідно до виразу (8.1) можна дати наступне формулювання другого закону термодинаміки: *незворотність термодинамічного процесу для тіла призводить до збільшення зміни ентропії незворотного процесу порівняно зі зміною ентропії аналогічного оборотного процесу, при тій же кількості підведеної зовнішньої теплоти.*

Для замкнутої ізольованої системи другий закон термодинаміки характеризує закономірність зміни її ентропії:

$$\Delta S_c \geq 0 \quad (8.2)$$

При цьому якщо в системі відбуваються оборотні процеси, $\Delta S_c = 0$, якщо незворотні – $\Delta S_c > 0$.

Оскільки всі реальні процеси незворотні, то у разі їх проходження у замкнутій ізольованій системі її ентропія завжди збільшуватиметься.

В ізольованій системі можна отримати корисну роботу тільки в тому випадку, якщо вона не перебуває в стані термодинамічної рівноваги. Працездатність системи вичерпується під час досягнення у ній рівноважного стану.

Найбільша можлива корисна робота може бути отримана при переході системи з нерівноважного стану до рівноважного, при протіканні в ній лише оборотних процесів.

У технічній термодинаміці найбільший інтерес представляє можливість отримання корисної роботи в системі, що складається з тіл та зовнішнього середовища, що перебувають у нерівноважному стані. Навколишнє середовище у більшості енергетичних установок виступає як холодне джерело теплоти.

Для оцінки максимально можливої кількості корисної роботи, яка може бути отримана в таких системах, в 1955 р. Югославським вченим З. Рантом було

запроваджено поняття ексергії.

Поняття ексергії відноситься до закритих і відкритих систем, а також джерел теплоти.

Ексергією обсягом називається максимально можлива корисна робота постійної маси речовини в закритій системі, яка може бути отримана при переході даної речовини (тіла) з нерівноважного стану в стан рівноваги з навколишнім середовищем тільки по оборотних процесах.

Розрахунковий вираз питомої ексергії тіла, що знаходиться в закритій системі, відповідає рівнянню

$$e=(u_1-u_{oc})-T_{oc}(s_1-s_{oc})+p_{oc}(v_1-v_{oc}), \quad (8.3)$$

де u_1, s_1, v_1 - параметри тіла, що знаходиться в нерівноважному стані із зовнішнім середовищем;

$T_{oc}, p_{oc}, u_{oc}, s_{oc}, v_{oc}$ – параметри тіла при тиску та температурі навколишнього середовища.

Розрахункового вираження ексергії джерела теплоти ізольованої системи немає, але є універсальна закономірність другого закону термодинаміки, що дозволяє розрахувати цю ексергію:

$$\Delta S_C = \Delta S_{ит} + \Delta S_{oc} = 0, \quad (8.4)$$

Де $\Delta S_C, \Delta S_{ит}, \Delta S_{oc}$ – зміна ентропії системи, джерела теплоти та довкілля відповідно.

Наприклад, ексергія джерела теплоти Q з постійною температурою $T_1=const$ (рис.8.1) відповідно до виразу (8.4) дорівнюватиме роботі оборотного циклу Карно в інтервалі температур T_1 і T_{oc} :

$$E = Q\left(1 - \frac{T_{oc}}{T_1}\right)$$

Втрати потенційно можливої корисної роботи (ексергії) при протіканні незворотних процесів визначаються за універсальним виразом, що називається теоремою Гюї-Стодоли,

$$\nabla E = -\Delta L_{мп} = T_{oc} \Delta S_C, \quad (8.5)$$

де $-\Delta L_{мп} = \nabla E = E_1 - E_2$ - втрати потенційно можливої роботи (ексергії);

T_{oc} - Температура зовнішнього середовища;

ΔS_C – зростання ентропії системи.

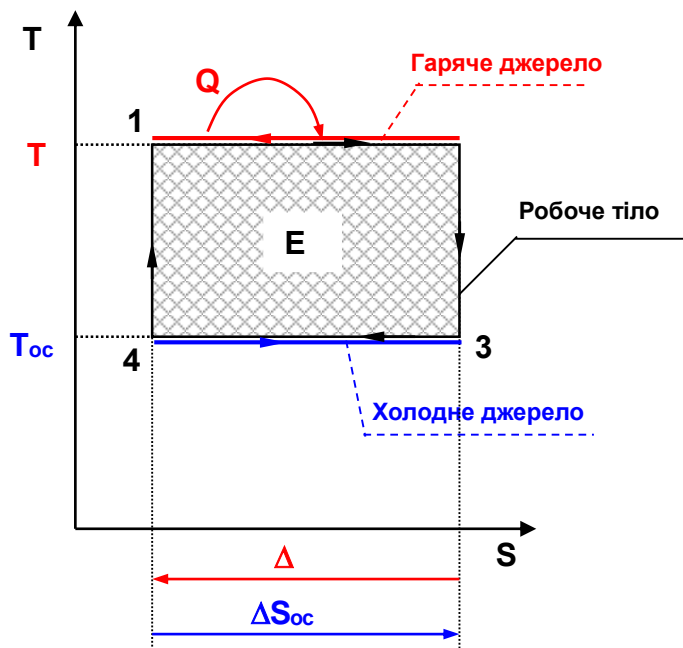


Рис. 8.1. До визначення ексергії джерела теплоти з постійною температурою

Термодинамічний аналіз ефективності роботи будь-якої теплоенергетичної установки виконується при спільному використанні першого та другого законів термодинаміки.

8.1. Завдання

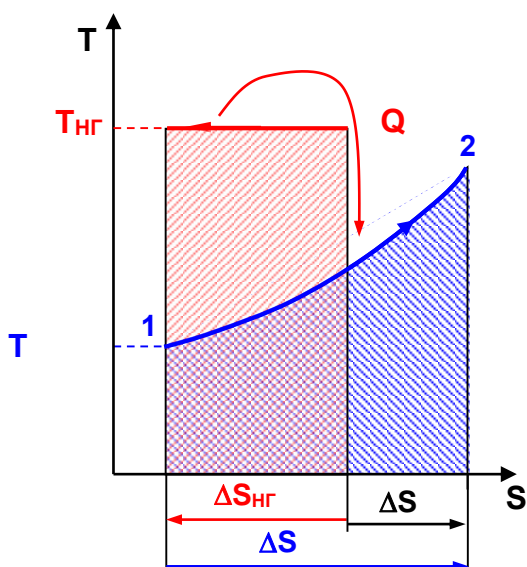


Рис. 8.2. Необоротний процес теплообміну в T,S-діаграмі

Приклад розв'язання задачі:

8.1. За допомогою електронагрівача (рис.8.2) 10 кг повітря ізобарно нагріваються від температури доквілля $t_1=t_{oc}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_2=700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура нагрівача $t_{нг}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ залишається постійною. Визначити збільшення ентропії системи та втрату можливої роботи – ексергії за рахунок незворотності цього процесу теплообміну. Вважати систему замкнутою ізольованою, а повітря ідеальним двоатомним газом з $c_p=\text{const}$.

Рішення

Зміни ентропії системи відповідає сума змін ентропій нагрівача та повітря, що нагрівається:

$$\Delta S_C = \Delta S_{нг} + \Delta S_B$$

Збільшення ентропії повітря при його нагріванні визначається за рівнянням ізобарного процесу

$$\Delta S_B = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 10 \cdot 1,005 \cdot \ln \frac{273 + 700}{273 + 20} = 12,06 \text{ кДж/К.}$$

Кількість теплоти, віддана нагрівачем, визначається відповідно до першого закону термодинаміки як кількість теплоти, отриманої повітрям, але із зворотним знаком

$$Q = -mc_p(t_2 - t_1) = -10 \cdot 1,005(700 - 20) = -6834 \text{ кДж.}$$

За цією теплоотою розраховується зміна ентропії нагрівача при ізотермічному відводі теплоти від нього:

$$\Delta S_{\text{НГ}} = \frac{Q}{T_{\text{НГ}}} = \frac{-6834}{273 + 1000} = -5,37 \text{ кДж/К.}$$

Отже, зміні ентропії системи відповідатиме величина

$$\Delta S_C = \Delta S_{\text{НГ}} + \Delta S_B = -5,37 + 12,06 = 6,69 \text{ , кДж/К.}$$

За теоремою Гюї-Стодоли втрата максимально-можливої корисної роботи (ексергії) системи визначається як

$$\nabla E = -\Delta L_{\text{мп}} = T_{\text{ос}} \Delta S_C = 293 \cdot 6,69 = 1960,2 \text{ кДж.}$$

8.2. Двигун працює за оборотним циклом Карно в інтервалі температур $t_1=300 \text{ }^\circ\text{C}$ і $t_2=50 \text{ }^\circ\text{C}$ і виконує роботу в 420 кДж.

Визначити термічний ККД циклу та кількість теплоти, повідомлене робочому тілу та відведене від нього.

Відповідь: $\eta_t^k = 0,436$, $Q_1 = 963 \text{ кДж}$, $Q_2 = 543 \text{ кДж}$.

8.3. Холодильна установка працює за оборотним циклом Карно в інтервалі температур $t_1=20 \text{ }^\circ\text{C}$ та $t_2=-20 \text{ }^\circ\text{C}$ і витрачає роботу в кількості 100 кДж.

Визначити холодильний коефіцієнт циклу та його холодопродуктивність Q_2 .

Відповідь: $\varepsilon_t^k = 6,325$, $Q_2 = 632,5 \text{ кДж}$.

8.4. Опалювальна установка (тепловий насос) працює за оборотним циклом Карно в інтервалі температур $t_1=100 \text{ }^\circ\text{C}$ та $t_2=10 \text{ }^\circ\text{C}$, витрачаючи роботу в кількості 100 кДж.

Визначити опалювальний коефіцієнт циклу та його теплопродуктивність Q_1 .

Відповідь: $\phi_t^k = 4,14$, $Q_1 = 414 \text{ кДж}$.

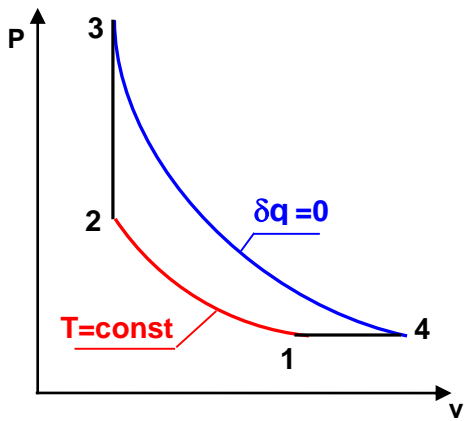


Рис. 8.3. До задачі 8.5

8.5. Визначити термічний ККД і роботу циклу, зображеного на рис.8.3, якщо робоче тіло є багатоатомним ідеальним газом. $\mu=29,7$ кг/кмоль, а параметри циклу у характерних точках задані величинами: $p_1=1$ бар, $t_1=27$ °С, $V_4=0,5$ м³, $v_1/v_2=2$, $p_3/p_2=4$. Порівняти термічний ККД цього циклу з ККД циклу Карно, що працює в інтервалі максимальної та мінімальної температури даного циклу.

Відповідь: $\eta_t=31,2\%$; $L_t=57,6$ кДж, $\eta_t^k=75\%$.

8.6. Електричний нагрівач потужністю 1 кВт маючи постійну температуру 100 °С, обігріває приміщення з температурою 20 °С протягом однієї години. Визначити зміну ентропії даної системи, якщо температура у приміщенні цей період не змінилася. Показати процеси передачі теплоти та збільшення ентропії системи в T,S-діаграмі.

Відповідь: $\Delta S_C=2,635$ кДж/К.

8.7. 100 кг льоду з $t_1 = -10$ °С поміщені в доквілля з $t_{oc} = 20$ °С (рис. 8.3). Крига тоне, і вода нагрівається до температури навколишнього середовища $t_2=t_{oc}$. Тиск льоду та води дорівнює тиску навколишнього середовища та постійні.

Визначити зміну ентропії H₂O та системи внаслідок цього процесу.

Показати процеси передачі теплоти та зміна ентропії системи в T,S-діаграмі.

У розрахунку прийняти постійними такі величини:

питому теплоту танення льоду $\lambda=333$ кДж/кг,

питому теплоємність льоду $c_{p,л}=2,03$ кДж/(кг·К),

питому теплоємність води $c_{p,ж}=4,187$ кДж/(кг·К).

Відповідь: $\Delta S_{H_2O}=159,2$ кДж/К, $\Delta S_C=10,04$ кДж/К.

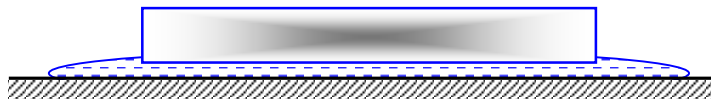


Рис. 8.4. До задачі 8.7

8.8. У термосі знаходиться 1 кг води при 100 °С, температура навколишнього середовища 20 °С. Після відкриття кришки термоса температура води знизилася до 50 °С. Визначити зміну ентропії даної системи, прийнявши ізобарну теплоємність води постійної та рівної 4,187 кДж/(кг·К). Показати процеси передачі теплоти в T,S-діаграмі.

Відповідь: $\Delta S_C=112$ Дж/К.

8.9. У бак, що містить 20 кг води з $t_1=10\text{ }^\circ\text{C}$, вливається 15 кг води з $t_2 = 80\text{ }^\circ\text{C}$. Вважаючи бак адіабатною оболонкою, а процес змішування ізобарним з постійною теплоємністю води з $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=4,19\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, визначити зростання ентропії системи за рахунок незворотності процесу змішування води та втрату максимально можливої роботи (ексергії) системи при температурі зовнішнього середовища $5\text{ }^\circ\text{C}$.

Відповідь: $\Delta S_c=0,885\text{ кДж}/\text{К}$, $-\Delta L_{\text{мп}}=\nabla E=246\text{ кДж}$.

8.10. Два шматки льоду масою по 1 кг кожен мають температуру $0\text{ }^\circ\text{C}$ та тиск 1 бар. Відбувається механічна взаємодія цих шматків у вигляді тертя, вони взаємодіють гладкими поверхнями без руйнування (рис. 8.5). На переміщення шматків витрачається робота у кількості 100 кДж. Визначити кількість льоду, що розплавився, в результаті такої взаємодії і збільшення ентропії системи, якщо вважати, що теплообмін з навколишнім середовищем відсутній. Зобразити цей процес у T,S-діаграмі.

Прийняти питому теплоту плавлення льоду $333\text{ кДж}/\text{кг}$.

Відповідь: $\Delta m=0,3\text{ кг}$, $\Delta S_c=366\text{ Дж}/\text{К}$.

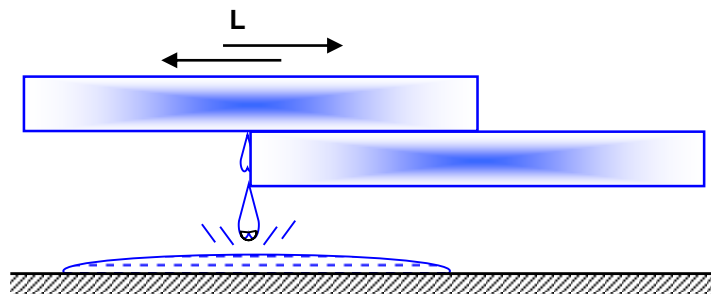


Рис. 8.5. До задачі 8.10

8.11. У бак, де знаходиться 20 кг льоду за температури $0\text{ }^\circ\text{C}$, вливається 15 кг води з температурою $80\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 8.6). Тиск води та льоду дорівнює атмосферному тиску. Не враховуючи теплообмін із зовнішнім середовищем, визначити зміну ентропії цієї системи при переході її в рівноважний стан. Прийняти питому теплоту плавлення льоду, що дорівнює $333\text{ кДж}/\text{кг}$, а теплоємність води $c_{\rho\text{H}_2\text{O}}=4,187\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Відповідь: $\Delta S_c = 2,26\text{ кДж}/\text{К}$.

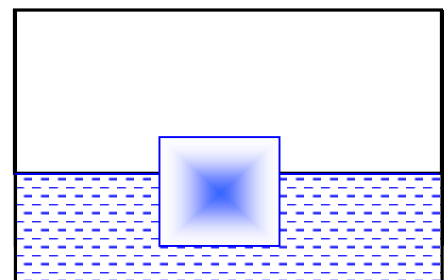


Рис. 8.6. До задачі 8.11

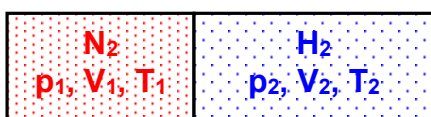


Рис. 8.7. До задачі 8.12

8.12. Визначити зростання ентропії системи при дифузійному змішуванні азоту (N_2) та водню (H_2) (рис. 8.7).

Задано: $V_1=1\text{ м}^3$; $V_2=2\text{ м}^3$; $p_1=p_2=1\text{ бар}$;

$t_1=t_2=t_{\text{oc}}=30\text{ }^\circ\text{C}$. Гази вважати ідеальними.

Відповідь: $\Delta S_c = 0,63\text{ кДж}/\text{К}$.

8.13. Визначити питому ексергію обсягом ідеального повітря при $t_1=400\text{ }^\circ\text{C}$ і $p_1=10$ бар, якщо довкілля має параметри: $t_{oc}=20\text{ }^\circ\text{C}$, $p_{oc}=1$ бар. Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з $\mu=28,96$ кг/кмоль.

Відповідь: $e=156,7$ кДж/кг.

8.14. Визначити питому ексергію обсягом водяної пари при $t_1=300\text{ }^\circ\text{C}$ і $p_1=10$ бар, якщо довкілля має параметри: $t_{oc}=20\text{ }^\circ\text{C}$, $p_{oc}=1$ бар.

Відповідь: $e=734$ кДж/кг.

8.15. Визначити ексергію джерела теплоти з $T=500\text{ K}=\text{const}$, що віддає 100 кДж теплоти, якщо температура довкілля $t_{oc}=20\text{ }^\circ\text{C}$. Показати ексергію в T, S -діаграмі.

Відповідь: $E=41,4$ кДж.

8.16. Визначити ексергію джерела теплоти у вигляді 1 кг ізобарно повітря, що охолоджується від $t_1=500\text{ }^\circ\text{C}$ до температури навколишнього середовища $t_2=t_{oc}=20\text{ }^\circ\text{C}$. Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з $\mu=28,96$ кг/кмоль.

Показати ексергію в T, S -діаграмі.

Відповідь: $E=196$ кДж.

8.17. Визначити ексергію джерела теплоти у вигляді 1 кг водяної пари, що ізобарно охолоджується від $p_1=10$ бар і $t_1=500\text{ }^\circ\text{C}$ до температури навколишнього середовища $t_2=t_{oc}=20\text{ }^\circ\text{C}$.

Показати ексергію в T, S -діаграмі.

Відповідь: $E=1205$ кДж.

8.18. Визначити зміну ентропії системи та втрату ексергії джерела теплоти з $t_1=1500\text{ }^\circ\text{C}=\text{const}$, що віддає 1000 кДж теплоти іншому тілу з постійною температурою $t_2=500\text{ }^\circ\text{C}=\text{const}$, якщо температура навколишнього середовища $t_{oc}=20\text{ }^\circ\text{C}$.

Відповідь: $\Delta S_c=0,730$ кДж/К, $\nabla E=E_1-E_2=213,8$ кДж.

8.19. У водогрійному котлі 100 т води ізобарно нагріваються від 12 до $120\text{ }^\circ\text{C}$ за рахунок теплоти газів, що ізобарно охолоджуються, від 1500 до $200\text{ }^\circ\text{C}$, які надалі викидаються через димову трубу в навколишнє середовище. Визначити зростання ентропії даної системи та втрату можливої роботи (ексергії) за рахунок незворотності процесу теплообміну (ΔS_{TO} , ∇E_{TO}) і за рахунок викиду газів, що йдуть в атмосферу з температурою $t_{oc}=5\text{ }^\circ\text{C}$ (ΔS_{YX} , ∇E_{YX}). Процеси теплообміну та зміна ентропії системи показати в T, S -діаграмі.

Прийняти постійними ізобарні теплоємності газів $c_p=1$ кДж/(кг·К) та води $c_{pH_2O}=4,187$ кДж/(кг·К).

Відповідь: $\Delta S_{TO}=88,58$ МДж/К, $\nabla E_{TO}=24625$ МДж,

$\Delta S_{YX}=5,91$ МДж/К, $\nabla E_{YX}=1644$ МДж.

8.20. 100 кг продуктів згоряння палива з температурою $T_1=1800\text{ K}$ (рис. 8.8) та

постійною теплоємністю $c_p=1$ кДж/(кг·К) використовуються як джерело теплоти (процес А-Б) для здійснення циклу Карно ГДЕІ з вищою температурою $T_1^k=800$ К і нижчою температурою, що відповідає зовнішньому середовищу $T_2^k=T_{oc}=290$ К. Визначити:

ексергію (максимальну працездатність) продуктів згорання та роботу циклу Карно,

зростання ентропії системи та втрату ексергії за рахунок незворотностей при здійсненні циклу Карно,

коефіцієнти використання теплоти η_Q для оборотних циклів ГАВІ та ГДЕІ, відносний ексергетичний ККД циклу Карно $\eta_{ex}^{ГДЕІ}=L_t^k/E_{AB}$.

Відповідь: $E_{AB}=98$ МДж, $L_t^k=63,75$ МДж, $\Delta S_c=118,3$ кДж/К, $\nabla E=34,3$ МДж
 $\eta_Q^{ГABІ}=0,765$, $\eta_Q^{ГДЕІ}=0,638$, $\eta_{ex}^{ГДЕІ}=0,65$.

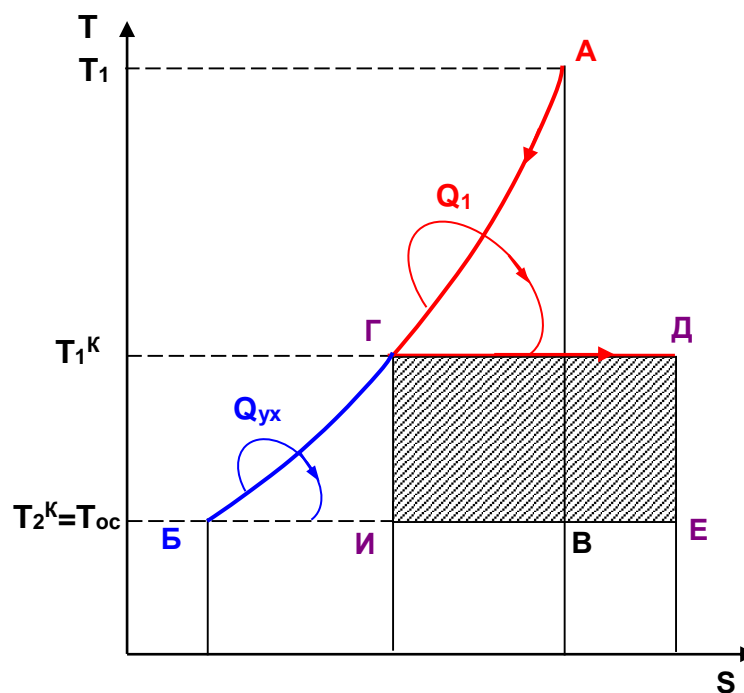


Рис. 8.8. До задачі 8.20

8.2. Контрольні питання

1. Сформулюйте другий закон термодинаміки для тіла, використовуючи рівняння теплоти його процесу $\delta q=Tds$.
2. Поясніть, у чому фізичний сенс рівняння другого закону термодинаміки для замкнутої ізольованої системи $\Delta S_c \geq 0$?
3. Які умови необхідні для отримання корисної механічної роботи у термодинамічній системі?
4. Що таке ексергія тіла в обсязі та який розрахунковий вираз їй відповідає?
5. Що таке ексергія джерела теплоти та на підставі якої закономірності її можна

розрахувати?

6. Який універсальний вираз дозволяє розрахувати втрату ексергії у реальних незворотних процесах?
7. Який коефіцієнт характеризує теплову економічність прямого оборотного циклу теплового двигуна?
8. Який коефіцієнт характеризує теплову економічність зворотного оборотного циклу холодильної установки?
9. Який коефіцієнт характеризує теплову економічність зворотного оборотного циклу теплового насоса?
10. Які формулювання другого закону термодинаміки можна дати на прикладі прямих та зворотних циклів теплових установок?
11. У чому перевага ексергетичного та ентропійного методів оцінки термодинамічної економічності теплових машин порівняно з методом теплового балансу?

9. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ПОТОКУ. РОБОТА ЗМІНИ ТИСКУ У ПОТОКУ. ЕКСЕРГІЯ У ПОТОКУ

У будь-якій теплоенергетичній машині, чи то парова чи гідравлічна турбіна, компресор чи насос, є потік робочого тіла. Речовина, що рухається каналом (потік), відноситься до відкритої термодинамічної системи.

Перший закон термодинаміки для оборотного процесу руху речовини каналом (поток) має вигляд

$$h_o - h_k + q = \frac{c_k^2 - c_o^2}{2} + \ell_T, \quad (9.1)$$

де h_o , h_k і c_o , c_k – ентальпії та швидкості потоку на початку та в кінці процесу відповідно;

q – теплота процесу;

ℓ_T – Технічна робота, тобто. механічна робота на валу теплової машини (турбіни, насоса, компресора тощо).

Права частина рівняння (9.1) може бути подана як

$$\ell_o = \int_{p_o}^{p_k} -v dp = h_o - h_k + q, \quad (9.2)$$

де величина ℓ_o отримала назву роботи зміни тиску в потоці, а для оборотних процесів її називають роботою, що розташовується.

З виразу (9.2) видно, що робота зміни тиску в потоці можлива лише за наявності зміни тиску потоку $dp \neq 0$.

З виразів (9.1) та (9.2) випливає, що робота зміни тиску в потоці в загальному випадку може йти на зміну кінетичної енергії потоку та на здійснення технічної роботи. При цьому, коли немає зміни кінетичної енергії (турбіна, насос), робота зміни тиску в потоці дорівнює технічній роботі ($\ell_o = \ell_T$). У разі коли потоком не здійснюється технічна робота (сопловий канал, дифузор тощо), робота зміни тиску в потоці йде тільки на зміну кінетичної енергії потоку.

Розрахунковий вираз роботи зміни тиску в потоці для незворотного процесу аналогічно виразу (9.2) для оборотного процесу, відрізняються лише чисельні значення параметрів наприкінці процесу:

$$\ell_{oi} = h_o - h_{ki} + q. \quad (9.3)$$

У p,v - діаграмі роботи зміни тиску в потоці для оборотного процесу 1-2, відповідає площа під процесом в проекції на вісь тисків (рис. 9.1).

У T,s -діаграмі (рис. 9.2) роботі зміни тиску в потоці для оборотного процесу

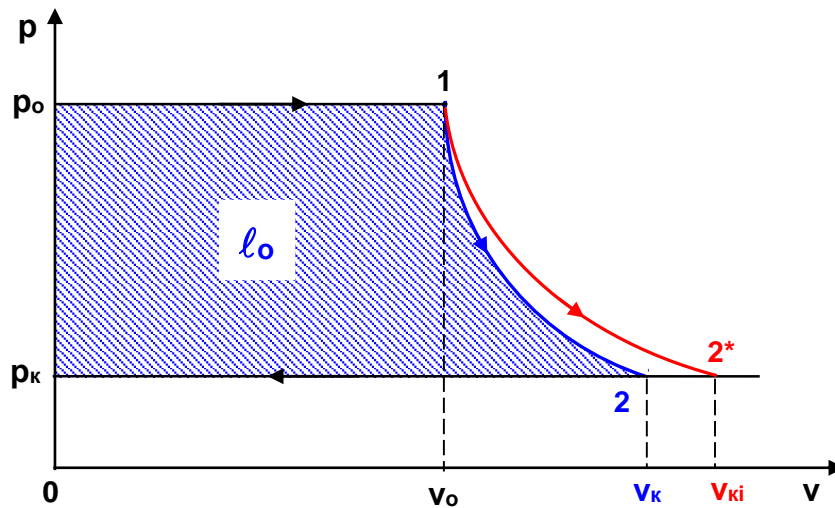


Рис.9.1. Оборотний 1-2 і незворотний 1-2* процеси розширення газу в p,v-діаграмі

для оборотного процесу 1-2 відповідає площа A122'A'A.

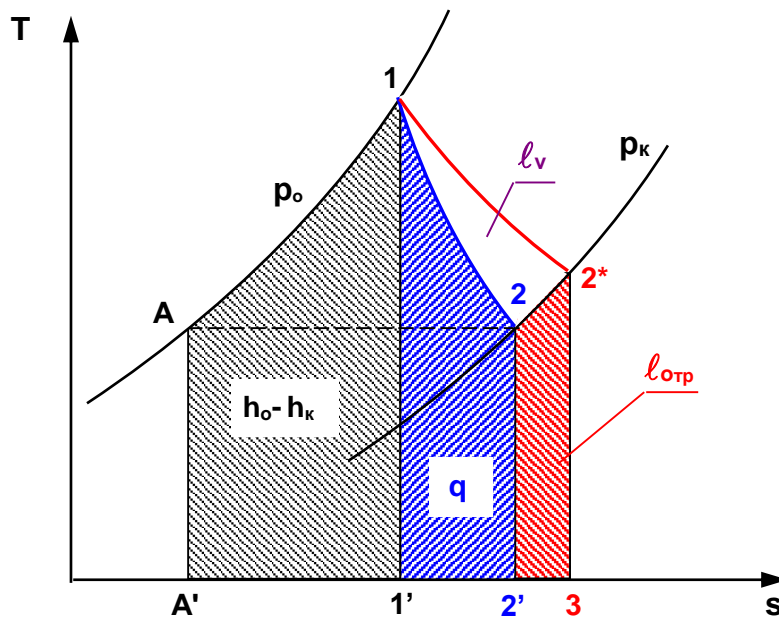


Рис.9.2. Оборотний 1-2 і незворотний 1-2* процеси розширення газу в T,s-діаграмі

Різниця робіт аналогічних оборотного l_0 і незворотного l_{oi} процесів є втратою роботи зміни тиску в потоці за рахунок тертя:

$$l_{отр} = l_0 - l_{oi} = h_{ki} - h_k. \quad (9.4)$$

Роботі l_{oi} в p,v-діаграмі відповідатиме менша площа, ніж площа під оборотним процесом 1-2 у проекції на вісь тисків (рис. 9.1), для її показу потрібні додаткові

побудови.

Втрата роботи $\ell_{o_{тр}}$, Викликана тертям, залежить тільки від кінцевого стану незворотного процесу - від h_{ki} , теплота тертя $q_{тр}$ залежить від траєкторії самого незворотного процесу 1-2* (рис.9.2). Різниця теплоти тертя та роботи тертя називається роботою повернення теплоти тертя ℓ_v :

$$\ell_v = q_{тр} - \ell_{o_{тр}} = \text{пл.12*21}. \quad (9.5)$$

Формули (9.2)÷(9.4) застосовні до потоку при розширенні речовини, коли $dp < 0$, отже, $\ell_o > 0$. При стисканні речовини $dp > 0$ і, отже, $\ell_o < 0$, у таких процесах витрачається технічна робота, наприклад, витрати технічної роботи на привід насосів або компресорів.

Роботу зміни тиску в потоці при стисканні в інженерній практиці беруть зі зворотним (позитивним) знаком, а в розрахунках, де це необхідно, надають її дійсний знак (негативний). Тому, позначивши її як $\ell_{o_{сж}}$, розрахунковий вираз роботи зміни тиску в потоці при стисканні набуває вигляду.

$$\ell_{o_{сж}} = -\ell_o = h_2 - h_1 - q. \quad (9.6)$$

Для незворотного процесу стиснення робота зміни тиску в потоці при стисканні більше, ніж для оборотного на величину роботи тертя:

$$\ell_{oi_{сж}} = \ell_{o_{сж}} + \ell_{o_{тр}} = h_{2i} - h_1 - q, \quad (9.7)$$

де $\ell_{o_{тр}} = h_{2i} - h_2$ - витрати роботи на подолання тертя.

Робота зміни тиску в потоці для адіабатних процесів

У двигунах теплових енергетичних установок (ТЕУ) процеси розширення робочого тіла швидкоплинні та теплообмін із довкіллям у них практично відсутній. Тому більшість процесів у двигунах ТЕУ вважаються адіабатними з $q=0$ (рис. 9.3).

Рівняння роботи зміни тиску в потоці для оборотного та незворотного адіабатних процесів розширення при $q=0$ мають вигляд (твір ізобарної теплоємності та різниці температур відноситься тільки до процесів ідеальних газів)

$$\ell_o = h_o - h_k = c_p(T_o - T_k); \quad (9.8)$$

$$\ell_{oi} = h_o - h_{ki} = c_p(T_o - T_{ki}). \quad (9.9)$$

Для теплових двигунів ефективність адіабатних процесів розширення і втрата роботи за рахунок тертя характеризується внутрішнім відносним ККД:

$$\eta_{oi} = \frac{l_{oi}}{l_o} = \frac{h_o - h_{ki}}{h_o - h_k} = \frac{c_p(T_1 - T_{2i})}{c_p(T_1 - T_2)}. \quad (9.10)$$

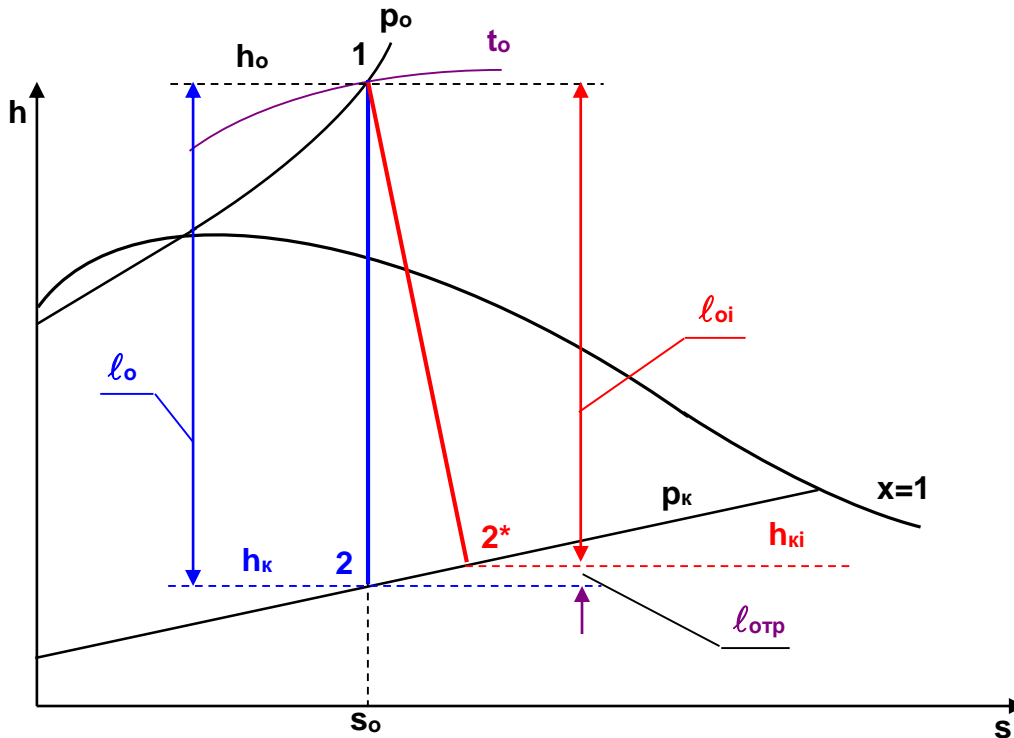


Рис. 9.3. Зображення роботи зміни тиску в потоці для оборотного 1-2 та незворотного 1-2* процесів адиабатного розширення водяної пари в h,s- діаграмі

Цей коефіцієнт визначається експериментально та використовується для розрахунку реальних процесів у теплових двигунах.

Розрахункові вирази роботи зміни тиску в потоці при адиабатному стисканні газів і рідин в компресорах і насосах мають вигляд (твір ізобарної теплоємності та різниці температур відноситься тільки до процесів ідеальних газів)

$$l_{o_{сж}} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1); \quad (9.11)$$

$$l_{oi_{сж}} = l_{o_{сж}} + l_{отр} = h_{2i} - h_1 = c_p(T_{2i} - T_1). \quad (9.12)$$

Необоротність процесу адиабатного стиснення в технічних пристроях характеризує адиабатний коефіцієнт стиснення (насоса, компресора тощо), що дозволяє визначити дійсну роботу стиснення, роботу тертя та дійсні параметри робочого тіла наприкінці процесу.

$$\eta_a = \frac{l_{o_{сж}}}{l_{oi_{сж}}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2i} - h_1} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_{2i} - T_1)}. \quad (9.13)$$

Адиабатний процес стиснення води в насосі в діапазоні тисків, що використовуються в ТЕУ, через погану стисливість води одночасно ізохорний. Це дозволяє розрахувати технічну роботу оборотного процесу стиснення води в

насосі за формулою для ізохорного процесу

$$\ell_{\text{OH}} = \int_{p_1}^{p_2} v dp = v_1(p_2 - p_1) \approx 0,001(p_2 - p_1), \quad (9.14)$$

де $v_1=0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$ – питомий обсяг води, величина практично стала для тисків p_1 і p_2 в ТЕУ.

Ексергія у потоці

Для речовини, що знаходиться в потоці, потенціал максимальної корисної роботи, яка теоретично могла бути отримана в тепловій машині, характеризується поняттям ексергії в потоці.

Ексергії в потоці відповідає технічна робота, рівна роботі зміни тиску в потоці при переході речовини з початкового стану стан рівноваги з навколишнім середовищем по оборотних процесах.

Розрахунковий вираз питомої ексергії у потоці має вигляд

$$e = h_1 - h_{\text{oc}} - T_{\text{oc}}(s_1 - s_{\text{oc}}), \quad (9.15)$$

де параметри h_1 , h_{oc} і s_1 , s_{oc} відповідають робочому тілу, оборотно переходить зі стану з параметрами p_1 , T_1 до стану рівноваги з навколишнім середовищем (у цьому стані у нього такі ж температура і тиск, як у навколишнього середовища).

Відповідно до теореми Гюї – Стодоли, втрата ексергії за рахунок будь-якого виду незворотності визначається як

$$\nabla E = -\Delta E = E_1 - E_2 = T_{\text{oc}}\Delta S_c, \quad (9.16)$$

де ΔS_c – збільшення ентропії системи з допомогою незворотностей процесів, які у ній.

9.1. Задачі

Приклад розв'язання задачі:

9.1. У повітряний тепловий двигун із внутрішнім відносним ККД $\eta_{\text{oi}}=0,7$ надходить повітря з параметрами $p_0=1,1 \text{ МПа}$, $t_0=270 \text{ }^\circ\text{C}$ і розширюється без теплообміну з довкіллям до $p_k=0,11 \text{ МПа}$ (рис. 9.4). Вважаючи, що реальний незворотний процес зміни стану повітря (1-2*) описується рівнянням $pv^n=\text{const}$, визначити питомі теоретичну та дійсну технічні роботи, втрату роботи за рахунок тертя, теплоту тертя, зростання ентропії повітря.

Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з постійними теплоємностями c_p і c_v .

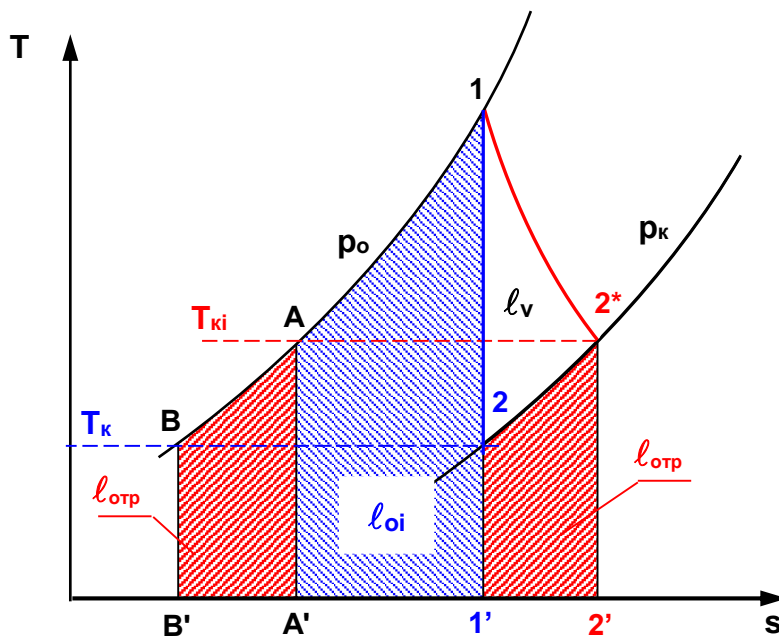


Рис.9.4. Оборотний 1-2 і незворотний 1-2* процеси адиабатного розширення ідеального повітря в T,s- діаграмі

Рішення

При оборотному адиабатному розширенні повітря (процес 1-2, рис. 9.4) його кінцева температура визначається як

$$T_k = T_o \left(\frac{p_o}{p_k} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 543,15 \left(\frac{1,1}{0,11} \right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = 281,3 \text{ К.}$$

Дійсна температура повітря наприкінці процесу розширення відповідає величині

$$T_{ki} = T_o - \eta_{oi}(T_o - T_k) = 543,15 - 0,7(543,15 - 281,3) = 360 \text{ К.}$$

Ідеальна питома технічна робота двигуна відповідає площі 11'B'В1 і розраховується за постійної ізобарної теплоємності повітря як

$$c_p = \frac{R}{2}(i+2) = \frac{8314}{2 \cdot 28,96}(5+2) = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$l_o = h_o - h_k = c_p(T_o - T_k) = 1,005(543,15 - 281,3) = 263,2 \text{ кДж/кг.}$$

Дійсна питома технічна робота двигуна відповідає площі 11'A'A1 і розраховується як

$$l_{oi} = h_o - h_{ki} = c_p(T_o - T_{ki}) = 1,005(543,15 - 360) = 184,2 \text{ кДж/кг.}$$

Втрата питомої технічної роботи за рахунок тертя відповідає площам $22 \cdot 2 \cdot 1'2$ та $ВАА'В'В$ та розраховується як

$$\ell_{o_{тр}} = \ell_o - \ell_{oi} = c_p(T_{ki} - T_k) = 1,005(360 - 281,3) = 79 \text{ кДж/кг.}$$

Теплоті тертя відповідає площа під процесом 1-2*. Для її визначення необхідно знати теплоємність цього процесу та показник політропи.

Показник політропи визначається з рівняння процесу

$$\frac{T_{ki}}{T_o} = \left(\frac{p_o}{p_k}\right)^{\frac{1-n}{n}} \rightarrow \frac{1-n}{n} = \frac{\text{Ln}\left(\frac{T_{ki}}{T_o}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{p_o}{p_k}\right)} = \frac{\text{Ln}\left(\frac{360}{543,15}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{1,1}{0,11}\right)} = -0,179 \rightarrow n = 1,22$$

Теплоємність процесу 1-2*

$$c = c_v \frac{n-k}{n-1} = 0,718 \frac{1,22-1,4}{1,22-1} = -0,6 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К).}$$

Теплота тертя

$$q_{тр} = c(T_{ki} - T_o) = -0,6(360 - 543,15) = 110 \text{ кДж/кг.}$$

Збільшення ентропії в незворотному адіабатному процесі в загальному випадку можна визначити за параметрами на початку і в кінці процесу, а в цьому процесі можна скористатися закономірністю процесу, застосувавши рівняння

$$s_{2^*} - s_1 = c \cdot \text{Ln}\left(\frac{T_{ki}}{T_o}\right) = -0,6 \cdot \text{Ln}\left(\frac{360}{543,15}\right) = 0,247 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К).}$$

9.2. У тепловому двигуні як робоче тіло використовується ідеальне повітря, яке адіабатно розширюється від початкового стану, що визначається параметрами $p_o=15$ бар, $t_o=300$ °С, до кінцевого стану з параметрами $p_k=1$ бар, $t_{ki}=50$ °С. Вважаючи, що реальний процес розширення повітря підпорядковується рівнянню політропи $pvn=\text{const}$, визначити питому теоретичну ℓ_o та дійсну ℓ_{oi} технічні роботи, втрату роботи за рахунок тертя $\ell_{o_{тр}}$, теплоту тертя $q_{тр}$, роботу повернення теплоти тертя $\ell_v = q_{тр} - \ell_{o_{тр}}$ та внутрішній відносний ККД двигуна

η_{oi} .

Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з постійними теплоємностями c_p і c_v .

Відповідь: $\ell_o=309$ кДж/кг; $\ell_{oi}= 250$ кДж/кг; $\ell_{o_{тр}}=59$ кДж/кг; $q_{тр}=108$ кДж/кг;

$$\ell_v=49 \text{ кДж/кг; } \eta_{oi}=0,81.$$

9.3. У тепловому двигуні водяна пара адіабатно розширюється від початкового стану з параметрами $p_o=30$ бар, $t_o=400$ °С до тиску $p_k=0,05$ бар. Визначити питому

теоретичну l_0 та дійсну l_{oi} технічні роботи, втрату роботи за рахунок тертя $l_{отр}$, при внутрішньому відносному ККД двигуна $\eta_{oi}=0,84$.

Відповідь: $l_0=1130$ кДж/кг; $l_{oi}=950$ кДж/кг; $l_{отр}=180$ кДж/кг.

9.4. У компресорі повітря адіабатно стискається від тиску $p_1=1$ бар до $p_2=10$ бар, при цьому його температура підвищується від $T_1=295$ До $T_2=640$ К. Визначити питому теоретичну l_0 та дійсну l_{oi} технічні роботи, втрату роботи за рахунок тертя $l_{отр}$ та адіабатний коефіцієнт компресора. Показати в діаграмі T,s процес

та відповідні йому l_0 , l_{oi} , $l_{отр}$.

Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з постійними теплоємностями c_p і c_v .

Відповідь: $l_0=276$ кДж/кг; $l_{oi}=347$ кДж/кг; $l_{отр}=71$ кДж/кг; $\eta_k=0,795$.

9.5. Визначити питому теоретичну та дійсну технічні роботи стиснення води в насосі. Параметри води на вході в насос $p_1=15$ бар, $t_1 = 25$ °С, тиск на виході $p_2 = 100$ бар. Процес стиснення вважати адіабатним, а адіабатний коефіцієнт насоса $\eta_n=0,8$.

Відповідь: $l_0=8,5$ кДж/кг, $l_{oi}= 10$ кДж/кг.

9.6. У компресорі адіабатно стискається повітря від $p_1=1$ бар і $t_1=17$ °С до $p_2=8$ бар. Визначити потужність компресора при витраті повітря 6 кг/с та адіабатному коефіцієнті компресора $\eta_k=0,82$.

Вважати повітря ідеальним двоатомним газом з $\mu=28,96$ кг/кмоль.

Відповідь: $W_{ki}=1,72$ МВт.

9.7. Компресор всмоктує 120 м³/год повітря при $p_1=1$ бар і $t_1=27$ °С і оборотно стискає його до тиску $p_2=12$ бар. Визначити температуру повітря після стиснення і потужність, що витрачається на привід компресора, якщо процес стиснення а) адіабатний; б) політропний з $n=1,3$; в) ізотермічний.

Зобразити процеси стискування у діаграмах p,v і T,s (всі три з однієї точки на кожній діаграмі).

Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з постійними теплоємностями c_p і c_v .

Відповідь: а) $t_2=337$ °С; $W_k=12$ кВт;

б) $t_2=259$ °С; $W_k=11,2$ кВт;

в) $t_2=27$ °С; $W_k=8,3$ кВт.

9.8. У двоступінчастому компресорі із проміжним ізобарним охолодженням (рис. 9.5) повітря політропно стискається від тиску 1 бар до 60 бар. Початкова

температура повітря в кожному ступені однакова $t_1=t_3=20\text{ }^\circ\text{C}$. Відношення тисків у кожному ступені також однаково $v_1=p_2/p_1=v_2=p_4/p_3$. Показник політропи $n=1,25$ у кожному щаблі стиснення компресора. Об'ємна продуктивність компресора $500\text{ н.м}^3/\text{год}$ (за нормальних фізичних умов). Визначити потужність, необхідну приводу компресора. Зобразити процес стиснення повітря діаграмах p,v і T,s . Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з постійними теплоємностями c_p і c_v .

Відповідь: $W_k=120\text{ кВт}$.

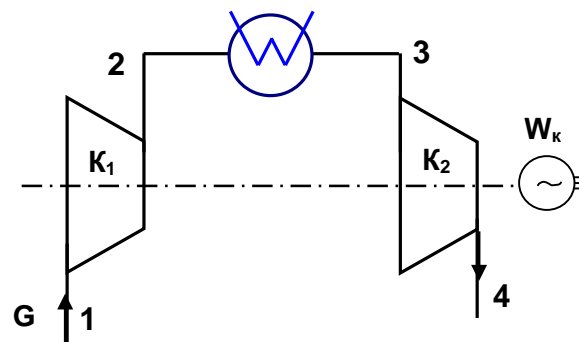


Рис. 9.5. Схема двоступінчастого компресора з проміжним ізобарним охолодженням повітря

9.9. У триступеневому компресорі (рис. 9.6) тиск повітря підвищується від 1 до 100 бар. Масова продуктивність компресора $G=350\text{ кг/год}$. У всіх щаблях стиск відбувається по політропі з показником $n=1,3$, що забезпечується охолодженням циліндрів водою з масовим витратою D_1 . У проміжних охолоджувачах повітря охолоджується до початкової температури, що дорівнює $t_1=t_3=t_5=17\text{ }^\circ\text{C}$, водою з масовою витратою D_2 . Тиск між щаблями компресорів вибрати оптимальними. Визначити теоретичну потужність двигуна, необхідну для приводу компресора, витрата охолоджувальної води на кожен щабель компресора D_1 , на кожний проміжний охолоджувач D_2 і загальну витрату охолоджувальної води $D=3D_1+2D_2$ при підвищенні температури на $15\text{ }^\circ\text{C}$ в кожному з елементів компресора. Зобразити процес стиснення повітря діаграмі T,s .

Повітря вважати ідеальним двоатомним газом з постійними теплоємностями c_p і c_v .

Відповідь: $W_k = 44,8\text{ кВт}$; $D_1=165\text{ кг/год}$; $D_2=686\text{ кг/год}$; $D=1867\text{ кг/год}$.

Вказівки до завдання 9.9. При термодинамічно оптимальному багатоступеневому стиску в компресорі виходить, що ступеня підвищення тиску повітря у всіх щаблях компресора повинні бути однакові, що відповідає виразу

$$v_1 = \frac{p_2}{p_1} = v_2 = \frac{p_4}{p_3} = v_3 = \frac{p_6}{p_5} = \sqrt[3]{\frac{p_6}{p_1}}$$

Для вихідних даних завдання та при оптимальному ступені підвищення тиску повітря в кожному ступені компресора звернути увагу на процеси в кожному

ступені компресора в T,s -діаграмі, це втричі скоротить розрахунки!

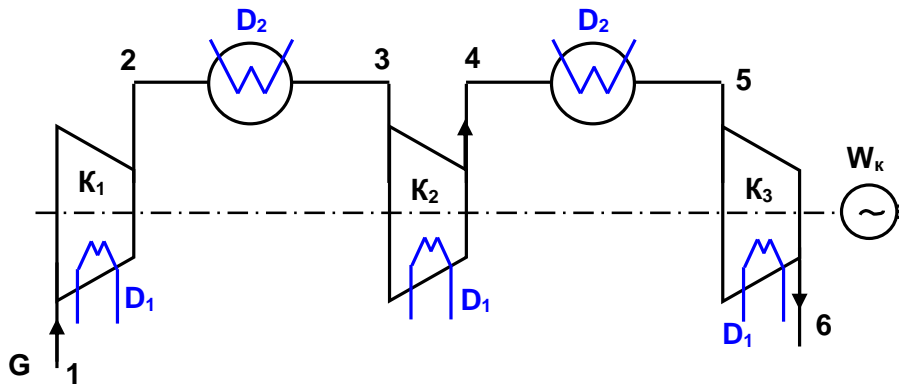


Рис. 9.6. Схема триступеневого компресора з проміжним ізобарним охолодженням повітря

9.10. Визначити питому ексергію в потоці для ідеального кисню O_2 ($\mu=32$ кг/кмоль) при $p=10$ бар та $t=300$ °С та параметрах навколишнього середовища $p_{oc}=1$ бар, $t_{oc}=20$ °С. Кисень вважати ідеальним газом із постійною ізобарною теплоємністю.

Відповідь: $e=251,1$ кДж/кг.

9.11. Визначити питому ексергію в потоці для водяної пари при $p=10$ бар та $t=300$ °С та параметрах навколишнього середовища $p_{oc}=1$ бар, $t_{oc}=20$ °С.

Відповідь: $e=967$ кДж/кг.

9.2. Контрольні питання

1. Яка принципова відмінність у роботі зміни тиску в потоці порівняно з роботою зміни об'єму газу чи рідини?
2. Напишіть розрахункові вирази для зміни тиску в потоці стосовно оборотних і незворотних процесів розширення газу або рідини.
3. Покажіть роботу зміни тиску в потоці p,v -, T,s - і h,s -діаграмах для оборотних і незворотних адіабатних процесів розширення ідеальних газів.
4. Покажіть роботу зміни тиску в потоці в T,s - і h,s -діаграмах для оборотних та незворотних адіабатних процесів розширення водяної пари.
5. Напишіть розрахункові вирази для зміни тиску в потоці стосовно оборотних і незворотних процесів стиснення газу або рідини.
6. Покажіть роботу зміни поділу в потоці p,v -, T,s - і h,s -діаграмах для оборотних і незворотних адіабатних процесів стиснення ідеальних газів.

7. Покажіть роботу зміни поділу в потоці в T,s - і h,s -діаграмах для оборотних та незворотних адіабатних процесів стиснення води та водяної пари.
8. Чому стискати речовину в рідкій фазі більш доцільно порівняно зі стисненням до того ж тиску парової фази цієї речовини?
9. Напишіть розрахункові вирази для роботи зміни тиску в потоці стосовно оборотного процесу стиснення рідкої фази води і покажіть цей процес в p,v -діаграмі.
10. Які коефіцієнти характеризують незворотність в адіабатних процесах розширення та стиснення газів та рідин у технічних пристроях (турбіни, компресори, насоси тощо)?
11. Якими заходами можна знизити витрати технічної роботи на здійснення процесу стиснення газу до необхідного тиску?
12. Дайте визначення та напишіть розрахунковий вираз для питомої ексергії речовини, що знаходиться в потоці.
13. Покажіть графічно величину питомої ексергії речовини у потоці, що у нерівноважному стані з довкіллям в h,s -діаграмі.
14. Покажіть графічно величину втрати питомої ексергії речовини, що у потоці, при адіабатном незворотному процесі його розширення в h,s -діаграмі.
15. Покажіть графічно величину роботи повернення теплоти тертя речовини, що знаходиться в потоці, при адіабатному процесі його розширення в h,s -діаграмі.
16. Поясніть перевагу ексергетичного методу оцінки незворотності адіабатних процесів розширення речовин порівняно з використанням традиційних методів оцінки незворотності у таких процесах через адіабатні коефіцієнти.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1

СПІВВІДНОШЕННЯ ОДИНИЦЬ СІ З ВНЕСИСТЕМНИМИ ОДИНИЦЯМИ ДЕЯКИХ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН:

ТИСК

$$1 \text{ Н/м}^2 (\text{Па}) = 1 \cdot 10^{-5} \text{ бар} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ кгс/см}^2 (\text{атм. техн.}) = \\ = 0,102 \text{ мм вод.ст.} = 750 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1,02 \text{ кгс/см}^2 (\text{атм. техн.}) = 10,2 \text{ м вод.ст.} = \\ = 750 \text{ мм рт.ст.}$$

$$1 \text{ кгс/см}^2 (\text{ат. техн.}) = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,981 \text{ бар} = 736 \text{ мм рт.ст.} = \\ = 10 \text{ м вод.ст.}$$

$$1 \text{ атм (фіз.)} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,013 \text{ бар} = 1,033 \text{ кгс/см}^2 (\text{атм. техн.}) = \\ = 10,33 \text{ м вод.ст.} = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

$$1 \text{ мм вод.ст.} = 9,81 \text{ Па} = 9,81 \cdot 10^{-5} \text{ бар} = 10^{-4} \text{ кгс/см}^2 (\text{атм. техн.}) = \\ = 736 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$$

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 133 \text{ Па} = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ бар} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^2 (\text{атм. техн.}) = \\ = 13,6 \text{ мм вод.ст.}$$

(при гучтині ртуті $\rho_{\text{Hg}}=13595 \text{ кг/м}^3$ і води $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=1000 \text{ кг/м}^3$)

$$1 \text{ psi (англ. фунт/дюйм}^2) = 6,9 \text{ Па}$$

$$\text{inch Hg (дюйм рт.ст.)} = 3,386 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

ТЕМПЕРАТУРА

В Кельвинах $T = 273,15 + t$, К.

В градусах Цельсія $t = T - 273,15$, °С.

По Фаренгейту $F = 1,8t + 32$, °F.

По Реомюру $R = 0,8t$, °R.

ЕНЕРГІЯ – РОБОТА – ПОТУЖНІСТЬ

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad 1 \text{ кал} = 4,187 \text{ Дж}, \quad 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ кДж} \approx 860 \text{ ккал}, \quad 1 \text{ к.с. (кінська сила)} = 735,5 \text{ Вт}.$$

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ

Таблиця П2.1. Молярні маси газів

| Назва газу | Хімічна формула газу | Маса кіломолю μ, кг/кмоль |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| Водень | H ₂ | 2,016 |
| Гелій | He | 4,00 |
| Неон | Ne | 20,18 |
| Повітря (сухе) | - | 28,96 |
| Аргон | Ar | 39,94 |
| Азот | N ₂ | 28,01 |
| Кисень | O ₂ | 32,00 |
| Окис вуглецю | CO | 28,01 |
| Вуглекислий газ | CO ₂ | 44,01 |
| Метан | CH ₄ | 16,04 |
| Аміак | NH ₃ | 17,03 |
| Діоксид сірки | SO ₂ | 64,06 |
| Ацетилен | C ₂ H ₂ | 26,04 |
| Етилен | C ₂ H ₄ | 28,05 |
| Етан | C ₂ H ₆ | 30,07 |

Таблиця П2.2. Середні мольні теплоємності реальних газів, визначені від 0 °С, при атмосферному тиску в кДж/(кмоль·К)

| t °С | μ _{ср} | μ _{сv} | μ _{ср} | μ _{сv} | μ _{ср} | μ _{сv} | μ _{ср} | μ _{сv} |
|------|-----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Водень H ₂ | | Азот N ₂ | | Кисень O ₂ | | Повітря | |
| 0 | 28,32 | 20,30 | 29,12 | 20,80 | 29,27 | 20,96 | 29,07 | 20,76 |
| 100 | 28,94 | 20,62 | 29,14 | 20,83 | 29,54 | 21,22 | 29,15 | 20,84 |
| 200 | 29,07 | 20,76 | 29,29 | 20,91 | 29,93 | 21,62 | 20,30 | 20,99 |
| 300 | 29,12 | 20,81 | 29,38 | 21,07 | 30,40 | 21,67 | 29,52 | 21,21 |
| 400 | 29,20 | 20,87 | 29,60 | 21,29 | 30,88 | 22,56 | 29,78 | 21,78 |
| 500 | 29,25 | 20,93 | 29,86 | 21,55 | 31,33 | 23,02 | 30,10 | 21,88 |
| 600 | 29,32 | 21,00 | 30,15 | 21,83 | 31,76 | 23,45 | 30,41 | 22,02 |
| 700 | 29,41 | 21,10 | 30,45 | 22,14 | 32,15 | 23,84 | 30,72 | 22,41 |
| 800 | 29,52 | 21,20 | 30,75 | 22,43 | 32,50 | 24,19 | 31,03 | 22,71 |
| 900 | 29,65 | 21,33 | 31,04 | 22,72 | 32,83 | 24,51 | 31,32 | 23,00 |
| 1000 | 29,79 | 21,47 | 31,31 | 23,00 | 33,12 | 24,80 | 31,60 | 23,28 |
| 1200 | 30,11 | 21,79 | 31,82 | 23,51 | 33,63 | 25,32 | 32,11 | 23,79 |

Закінчення табл. П2.2

| t °C | μ _{cp} | μ _{cv} | μ _{cp} | μ _{cv} | μ _{cp} | μ _{cv} | μ _{cp} | μ _{cv} |
|------|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Ок. вугл. СО | | Дв-ок. вугл. СО ₂ | | Метан СН ₄ | | Водяний пар | |
| 0 | 29,12 | 20,18 | 35,86 | 27,55 | 26,42 | 34,74 | 33,50 | 25,18 |
| 100 | 29,18 | 20,86 | 38,11 | 29,80 | 36,82 | 28,49 | 33,74 | 25,43 |
| 200 | 29,30 | 20,99 | 40,06 | 31,74 | 39,43 | 31,11 | 34,12 | 25,80 |
| 300 | 29,52 | 21,20 | 41,76 | 33,44 | 42,27 | 33,96 | 34,58 | 26,26 |
| 400 | 29,79 | 21,47 | 43,25 | 34,94 | 45,18 | 36,87 | 35,09 | 26,78 |
| 500 | 30,10 | 21,78 | 44,57 | 36,26 | 47,98 | 39,66 | 35,63 | 27,32 |
| 600 | 30,43 | 22,11 | 45,75 | 37,44 | 50,67 | 42,36 | 36,20 | 27,88 |
| 700 | 30,75 | 22,44 | 46,81 | 38,50 | 53,28 | 44,96 | 36,79 | 28,47 |
| 800 | 31,07 | 22,76 | 47,76 | 39,45 | 55,90 | 47,59 | 37,39 | 29,08 |
| 900 | 31,38 | 23,06 | 48,62 | 40,29 | 58,33 | 50,02 | 38,02 | 29,62 |
| 1000 | 31,67 | 23,35 | 49,39 | 41,08 | 60,50 | 52,19 | 38,62 | 30,30 |
| 1200 | 32,19 | 23,88 | 50,74 | 42,43 | 62,46 | 54,14 | 39,83 | 31,51 |

Таблиця П2.3. Термодинамічні властивості ідеального повітря
μ=28,97 кг/кмоль

| t, °C | • T, K | h, кДж/кг | • u, кДж/кг | π _o | θ _o | s ^o , кДж/(кг·К) |
|-------|----------|-----------|-------------|----------------|----------------|-----------------------------|
| 1 | • 2 | 3 | • 4 | 5 | 6 | 7 |
| -20 | • 253,15 | 253,18 | • 180,52 | 0,7661 | 9482 | 6,5318 |
| -10 | • 263,15 | 263,20 | • 187,68 | 0,8771 | 8609 | 6,5707 |
| 0 | • 273,15 | 273,23 | • 194,83 | 0,9992 | 7845 | 6,6080 |
| 10 | • 283,15 | 283,26 | • 201,99 | 1,1330 | 7172 | 6,6441 |
| 20 | • 293,15 | 293,29 | • 209,16 | 1,2791 | 6577 | 6,6789 |
| 30 | • 303,15 | 303,33 | • 216,32 | 1,4383 | 6048 | 6,7126 |
| 40 | • 313,15 | 313,37 | • 223,50 | 1,6113 | 5577 | 6,7452 |
| 50 | • 323,15 | 323,42 | • 230,68 | 1,7988 | 5155 | 6,7768 |
| 60 | • 333,15 | 333,48 | • 237,86 | 2,001 | 4776 | 6,8074 |
| 70 | • 343,15 | 343,54 | • 245,06 | 2,220 | 4435 | 6,8372 |
| 80 | • 353,15 | 353,61 | • 252,26 | 2,455 | 4126 | 6,8661 |
| 90 | • 363,15 | 363,69 | • 259,47 | 2,709 | 3847 | 6,8943 |
| 100 | • 373,15 | 373,79 | • 266,70 | 2,980 | 3592 | 6,9217 |
| 110 | • 383,15 | 383,89 | • 273,93 | 3,271 | 3361 | 6,9484 |
| 120 | • 393,15 | 394,01 | • 281,18 | 3,582 | 3149 | 6,9745 |
| 130 | • 403,15 | 404,14 | • 288,43 | 3,914 | 2955 | 6,9999 |
| 140 | • 413,15 | 414,28 | • 295,71 | 4,268 | 2777 | 7,0248 |
| 150 | • 423,15 | 424,43 | • 302,99 | 4,645 | 2614 | 7,0491 |
| 160 | • 433,15 | 434,60 | • 310,29 | 5,046 | 2463 | 7,0728 |
| 170 | • 443,15 | 444,79 | • 317,61 | 5,472 | 2324 | 7,0961 |
| 180 | • 453,15 | 454,99 | • 324,94 | 5,923 | 2195 | 7,1188 |
| 190 | • 463,15 | 465,21 | • 332,29 | 6,402 | 2076 | 7,1411 |
| 200 | • 473,15 | 475,44 | • 339,65 | 6,909 | 1965,3 | 7,1630 |
| 210 | • 483,15 | 485,70 | • 347,03 | 7,445 | 1862,3 | 7,1844 |
| 220 | • 493,15 | 495,97 | • 354,44 | 8,011 | 1766,5 | 7,2055 |

| t, °C | • T, K | h, кДж/кг | • u, • кДж/кг | π _o | θ _o | s ^o , кДж/(кг·K) |
|-------|-----------|--------------|------------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| 230 | • 503,15 | 506,26 | • 361,86 | 8,609 | 1677,1 | 7,2261 |
| 240 | • 513,15 | 516,57 | • 369,30 | 9,240 | 1593,7 | 7,2464 |
| 250 | • 523,15 | 526,90 | • 376,75 | 9,905 | 1515,7 | 7,2664 |
| 260 | • 533,15 | 537,24 | • 384,23 | 10,605 | 1442,8 | 7,2860 |
| 270 | • 543,15 | 547,61 | • 391,73 | 11,341 | 1374,4 | 7,3052 |
| 280 | • 553,15 | 558,01 | • 399,25 | 12,115 | 1310,2 | 7,3242 |
| 290 | • 563,15 | 568,42 | • 406,80 | 12,929 | 1249,9 | 7,3428 |
| 300 | • 573,15 | 578,85 | • 414,36 | 13,784 | 1193,3 | 7,3612 |
| 310 | • 583,15 | 589,31 | • 421,95 | 14,680 | 1139,9 | 7,3793 |
| 320 | • 593,15 | 599,79 | • 429,56 | 15,621 | 1089,7 | 7,3971 |
| 330 | • 603,15 | 610,29 | • 437,19 | 16,606 | 1042,3 | 7,4147 |
| 340 | • 613,15 | 620,81 | • 444,84 | 17,638 | 997,6 | 7,4320 |
| 350 | • 623,15 | 631,36 | • 452,52 | 18,719 | 955,3 | 7,4490 |
| 360 | • 633,15 | 641,93 | • 460,22 | 19,849 | 915,4 | 7,4659 |
| 370 | • 643,15 | 652,52 | • 467,94 | 21,03 | 877,6 | 7,4825 |
| 380 | • 653,15 | 663,14 | • 475,69 | 22,26 | 841,8 | 7,4988 |
| 390 | • 663,15 | 673,78 | • 483,46 | 23,55 | 807,8 | 7,5150 |
| 400 | • 673,15 | 684,45 | • 491,26 | 24,90 | 775,7 | 7,5310 |
| 500 | • 773,15 | 792,43 | • 570,54 | 41,93 | 529,1 | 7,6805 |
| 600 | • 873,15 | 902,78 | • 652,19 | 66,93 | 374,3 | 7,8147 |
| 700 | • 973,15 | 1015,35 | • 736,07 | 102,40 | 272,7 | 7,9367 |
| 800 | • 1073,15 | 1129,91 | • 821,92 | 151,30 | 203,5 | 8,0488 |
| 900 | • 1173,15 | 1246,19 | • 909,51 | 217,0 | 155,10 | 8,1524 |
| 1000 | • 1273,15 | 1363,97 | • 998,59 | 303,6 | 120,32 | 8,2487 |
| 1100 | • 1373,15 | 1483,06 | • 1088,97 | 415,5 | 94,830 | 8,3387 |
| 1200 | • 1473,15 | 1603,31 | • 1180,52 | 557,8 | 75,782 | 8,4347 |
| 1300 | • 1573,15 | 1724,60 | • 1273,12 | 736,3 | 61,312 | 8,5029 |
| 1400 | • 1673,15 | 1846,84 | • 1366,66 | 957,4 | 50,155 | 8,5783 |
| 1500 | • 1773,15 | 1969,92 | • 1461,04 | 1228,0 | 41,439 | 8,6497 |

Таблиця П2.4. Термодинамічні властивості ідеального атмосферного азоту N₂ μ=28,15 кг/кмоль

| t, °C | • T, K | h, кДж/кг | • u, • кДж/кг | π _o | θ _o | s ^o , кДж/(кг·K) |
|-------|-----------|--------------|------------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| 0 | • 273,15 | 281,38 | • 200,70 | 0,7045 | 11451 | 6,6973 |
| 100 | • 373,15 | 384,53 | • 274,31 | 2,094 | 5262 | 7,0191 |
| 200 | • 473,15 | 488,32 | • 348,57 | 4,822 | 2897 | 7,2655 |
| 300 | • 573,15 | 593,47 | • 424,18 | 9,543 | 1773,8 | 7,4670 |
| 400 | • 673,15 | 700,57 | • 501,75 | 17,095 | 1162,9 | 7,6392 |
| 500 | • 773,15 | 809,97 | • 581,62 | 28,55 | 799,7 | 7,7907 |
| 1000 | • 1273,15 | 1389,83 | • 1013,80 | 200,99 | 187,08 | 8,3671 |
| 1500 | • 1773,15 | 2006,76 | • 1483,05 | 800,68 | 65,407 | 8,7753 |

Таблиця П2.5. Термодинамічні властивості ідеального кисню O₂
 $\mu=32,0$ кг/кмоль

| t, °C | • T, K | h, кДж/кг | • u, • кДж/кг | π_0 | θ_0 | s ⁰ , кДж/(кг·K) |
|-------|-----------|--------------|------------------|---------|------------|--------------------------------|
| 0 | • 273,15 | 247,75 | • 176,78 | 3,779 | 1877,6 | 6,3280 |
| 100 | • 373,15 | 339,95 | • 242,99 | 11,426 | 848,4 | 6,6155 |
| 200 | • 473,15 | 434,7 | • 311,77 | 27,14 | 452,8 | 6,8403 |
| 300 | • 573,15 | 532,57 | • 383,65 | 55,87 | 266,5 | 7,0278 |
| 400 | • 673,15 | 633,50 | • 458,6 | 104,33 | 167,62 | 7,1901 |
| 500 | • 773,15 | 737,14 | • 536,26 | 181,26 | 110,81 | 7,3336 |
| 1000 | • 1273,15 | 1282,43 | • 951,64 | 1462,2 | 22,621 | 7,8760 |
| 1500 | • 1773,15 | 1854,16 | • 1393,46 | 6274,6 | 7,342 | 8,2545 |

Таблиця П2.6. Термодинамічні властивості ідеального двоокису
 вуглецю CO₂ $\mu=44,01$ кг/кмоль

| t, °C | • T, K | h, кДж/кг | • u, • кДж/кг | π_0 | θ_0 | s ⁰ , кДж/(кг·K) |
|-------|-----------|--------------|------------------|---------|------------|--------------------------------|
| 0 | • 273,15 | 192,08 | • 140,48 | 0,09823 | 52529 | 4,7815 |
| 100 | • 373,15 | 278,90 | • 208,40 | 0,4102 | 17182 | 5,0515 |
| 200 | • 473,15 | 374,52 | • 285,13 | 1,3618 | 6563 | 5,2782 |
| 300 | • 573,15 | 477,36 | • 369,08 | 3,8635 | 2802 | 5,4752 |
| 400 | • 673,15 | • 586,17 | 459,00 | • 9,749 | 1304,3 | 5,6500 |
| 500 | • 773,15 | 699,92 | • 553,86 | 22,439 | 650,8 | 5,8075 |
| 1000 | • 1273,15 | 1318,38 | • 1077,87 | 579,2 | 41,520 | 6,4216 |
| 1500 | • 1773,15 | 1983,92 | • 1648,95 | 5960,1 | 5,620 | 6,8620 |

ДЕЯКІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ Н₂О

Параметри потрійної точки води: $t_o=0,01$ °С, $p_o=611,7$ Па ,
 ізобарна теплоємність льоду в потрійній точці води
 $c_{po}=2,1$ кДж/(кг·К),
 питома теплота плавлення льоду в потрійній точці води
 $\lambda_o=333$ кДж/кг.

Параметри критичної точки води: $t_{кр} = 373,946$ °С, $p_{кр} = 22,064$ МПа, $v_{кр} = 0,003106$ м³/кг;

Таблиця ПЗ.1. Залежність температури плавлення Н₂О від тиску

| | | | | | |
|----------------|--------|------|-------|-------|-------|
| $t_{пл}$, °С | 0,0 | -5 | -10 | -15 | -20 |
| $p_{пл}$, МПа | 0,0981 | 57,9 | 106,9 | 151,0 | 187,3 |

Таблиця ПЗ.2. Залежність температури насичення Н₂О тиску

| | | | | | |
|-------------|----------|--------|--------|--------|--------------------|
| t_n , °С | 0,0 | 100 | 200 | 300 | $t_{кр} = 373,946$ |
| p_n , бар | 0,006112 | 1,0142 | 15,547 | 85,877 | $P_{кр} = 220,64$ |

Це цікаво та пізнавально

Питомий об'єм рідкої фази води менше питомого об'єму твердої фази води при однакових значеннях їх тиску і температури (щільність води більша за щільність льоду), так при 1 барі і 0 °С питоми об'єм води 0,0010012 м³/кг, а льоду – 0,001095 м³/кг. Тому крига плаває на поверхні води.

Питомий об'єм води в стані насичення зі збільшенням температури від 0,01 оС до 4 °С (точніше, 3,98 °С) зменшується від $v'_o=0,00100022$ м³/кг до $v'_{min}=0,001$ м³/кг, а при подальшому збільшенні температури збільшується. Завдяки цій аномальності води можуть жити риби в водоймах, що замерзають, так як коли температура повітря падає нижче 4 °С, холодніша вода як менш щільна залишається на поверхні і замерзає, а під льодом зберігається позитивна температура води.

При ізобарному (докритичному $p < p_{кр}$) підвищенні температури води від 0 °С теплоємність спочатку зменшується, а потім збільшується. Найменша ізобарна теплоємність рідкої фази води при тиску (атмосферному) 1 бар відповідає температурі 36,79 °С (нормальна температура тіла людини) і дорівнює $c_p=4,179$ кДж/(кг·К). Ця властивість води дозволяє хворій людині при підвищенні температури довше уникнути зсідання крові.

Список використаної літератури

1. Кирилін В. О. Технічна термодинаміка: підручник для вузів / В.А. Кирилін, В.В. Сичов, А.Е. Шейндлін. - М.: Вища школа, 1983. - 416 с.
2. Бродянський В.М. Ексергетичний метод термодинамічного аналізу / В.М. Бродянський. - М.: Енергія, 1973. - 296 с.
3. Маргулова Т.Х. Атомні електричні станції: підручник для вузів / Т.Х. Маргулова. - М. : Вищ. шк., 1984. - 304 с.
4. Рівкін С. Л. Термодинамічні властивості газів / С.Л.Рівкін. - М.: Енергія, 1973. - 288 с.
5. Варгафтік Н. Б. Довідник з теплофізичних властивостей газів та рідин / Н.Б. Варгафтік.- М.:Наука, 1972. -720 с.

Навчальне видання

ТЕРМОДИНАМІКА СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Частина 1
Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

Укладачі:

ПОТАПОВ Володимир Олексійович

БІЛИЙ Дмитро Володимирович

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. Арк. ____

Наклад ____ пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

