

**І. А. ВАСИЛЕНКО,
С. О. КУМАНЬОВ,
О. А. ПІВОВАРОВ**

**ЗБІРНИК ЗАДАЧ ТА ВПРАВ
ДЛЯ ВИВЧЕННЯ
ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

*Навчальний посібник
для учнів спеціалізованих коледжів та студентів вищих
навчальних закладів III-IV рівня акредитації*

**Дніпропетровськ
Акцент ПП
2014**

УДК 536(076.1)
ББК 31.311я73
В 19

*Рекомендовано до друку Вченою радою ДВНЗ УДХТУ
Протокол №9 від 23.10.2013 р.*

Автори:

Василенко Інна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»;

Куманьов Сергій Олександрович – асистент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»;

Піваров Олександр Андрійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Рецензенти:

Чигиринець О. Е. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

Склабіньський В. І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процеси та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв Сумського державного університету

Голеус В. І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічної технології кераміки та скла ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Василенко І. А.

В-19 Збірник задач та вправ для вивчення термодинамічних процесів.
Навч. посіб. / І. А. Василенко, С. О. Куманьов, О. А. Піваров – Д.:
Акцент ПП, 2014. – 249 с.
ISBN 978-617-7109-44-9

У збірнику наведено короткий теоретичний курс термодинаміки з тестовими та теоретичними питаннями для самоперевірки. Підібрані найбільш часто використовувані на практиці задачі з прикладами їх розв'язання. Навчальний посібник призначений для учнів спеціалізованих коледжів та студентів вищих навчальних закладів III-IV рівня акредитації енергетичних та хіміко-технологічних спеціальностей, а також інших спеціальностей, які вивчають загальноосвітню дисципліну «Енерготехнологія теплотехнологічних процесів».

УДК 536(076.1)
ББК 31.311я73

ПЕРЕДМОВА

Курс технічної термодинаміки вивчають студенти різних спеціальностей. Випуск даного практичного посібника обумовлений специфікою підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів за напрямками «Теплоенергетика», «Хімічна технологія» та «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», денної, заочної і дистанційної форм навчання.

Під час підготовки видання була поставлена мета короткого викладення теоретичного курсу основ термодинаміки, який допоможе студентам підготуватись до вирішення конкретних промислових задач, які пов'язані зі спеціалізацією.

Навчальний посібник складається з 11 розділів та містить більше 600 задач та вправ. У посібнику системно викладений теоретичний курс без виведення фундаментальних рівнянь термодинаміки, приклади вирішення типових задач, задачі для самостійного вирішення, контрольні питання для самопідготовки і тестові завдання.

Наведені приклади і задачі дозволять студентам одержати знання для вирішення питань проектування теплових агрегатів у хімічній технології. Також розглянуті питання складання матеріальних і теплових балансів технологічних процесів, що особливо корисно для студентів, які виконують курсові роботи, випускні кваліфікаційні роботи і дипломні проекти.

У виданні наведені матеріали і довідкові дані, що є необхідними для вирішення задач і виконання контрольних заходів, що особливо важливо при дистанційній формі навчання.

Словник основних термінів і понять, які використовуються у термодинаміці, дозволить краще зрозуміти та засвоїти технічну інформацію курсу. У списку рекомендованої літератури наведені підручники для фундаментального вивчення курсу.

Навчальний посібник призначений для учнів спеціалізованих коледжів та студентів вищих навчальних закладів III-IV рівня акредитації енергетичних та хіміко-технологічних спеціальностей, а також інших спеціальностей, які вивчають загальноосвітню дисципліну «Енерготехнологія теплотехнологічних процесів».

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

Позначення	Назва величини	Розмірність (Значення)
T	Абсолютна температура	К
a	Температуропровідність	м ² /с
P	Тиск	Па
V	Об'єм	м ³
W _{сер}	Середня енергія молекул	Дж
W _{К сер}	Середня кінетична енергія молекул	Дж
m	Маса	кг
g	прискорення вільного падіння	9,81 м/с ²
μ, M	Молярна маса	г/моль
υ	Питомий об'єм	м ³ /кг
ρ	Густина	кг/м ³
N _A	Постійна Авагадро	6,0221415(10)·10 ²³ моль ⁻¹
k	Постійна Больцмана	1,3806505(24)·10 ⁻²³ Дж/К
R	Газова постійна	8,314472(15) Дж/(К·моль)
v	Кількість речовини	моль
γ	Питома вага	Н/м ³
i	Число ступенів свободи молекул	–
N _j , j = 1, ... n	Кількість речовини у j-му компоненті n-компонентної суміші	моль
μ _j , j = 1, ... n	Хімічний потенціал j-го компоненту n-компонентної суміші	Дж/моль
U	Внутрішня енергія	Дж
S	Ентропія	Дж/К
L	Робота	Дж
H = U + PV	Ентальпія	Дж
F = U – TS	Ізохорно-ізотермічний потенціал (вільна енергія Гельмгольца)	Дж
G = H – TS	Ізобарно-ізотермічний потенціал (вільна енергія Гіббса, вільна ентальпія)	Дж
W; L	Робота, яка здійснена газом	Дж
Q	Теплота, що була надана газу	Дж
C _p	Молярна теплоємність газу під постійним тиском	Дж/(К·моль)
C _v	Молярна теплоємність газу за постійного об'єму	Дж/(К·моль)
c _p , c _v	Питома теплоємність	Дж/(к·кг)
V ₀	Стандартний об'єм ідеального газу	22,41 л/моль

ЗМІСТ

1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ І ЗАКОНИ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ	8
1.1. Приклади розрахунків	14
1.2. Питання для самоконтролю	17
1.3. Тестові питання	18
1.4. Задачі	21
2. СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ ГАЗІВ І ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ	25
2.1. Приклади розрахунків	29
2.2. Питання для самоконтролю	32
2.3. Тестові питання	33
2.4. Задачі	36
3. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ	42
3.1. Приклади розрахунків	45
3.2. Питання для самоконтролю	47
3.3. Тестові питання	47
3.4. Задачі	49
4. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ	52
4.1. Приклади розрахунків	57
4.2. Питання для самоконтролю	61
4.3. Тестові питання	61
4.4. Задачі	72
5. ВОДЯНА ПАРА	77
5.1. Приклади розрахунків	82
5.2. Питання для самоконтролю	85
5.3. Тестові питання	85
5.4. Задачі	88
6. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ	91
6.1. Приклади розрахунків	97
6.2. Питання для самоконтролю	99
6.3. Тестові питання	100
6.4. Задачі	101
7. ВИТІКАННЯ І ДРОСЕЛЮВАННЯ ГАЗІВ І ПАРИ	103
7.1. Приклади розрахунків	108
7.2. Питання для самоконтролю	111

7.3. Тестові питання	111
7.4. Задачі	113
8. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ЦИКЛИ ТЕПЛОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ	117
8.1. Приклади розрахунків	127
8.2. Питання для самоконтролю	129
8.3. Тестові питання	130
8.4. Задачі	136
9. ЦИКЛИ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК І ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ	141
9.1. Приклади розрахунків	148
9.2. Питання для самоконтролю	151
9.3. Тестові питання	152
9.4. Задачі	153
10. ПАЛИВО І ЙОГО СПАЛЮВАННЯ	155
10.1. Приклади розрахунків	159
10.2. Питання для самоконтролю	161
10.3. Тестові питання	161
10.4. Задачі	162
11. МАТЕРІАЛЬНІ ТА ТЕПЛОВІ БАЛАНСИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	164
11.1. Матеріальний баланс	165
11.2. Тепловий баланс	169
11.3. Приклади розрахунків	173
11.4. Питання для самоконтролю	182
11.5. Тестові питання	183
11.6. Задачі	194
12. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	205
13. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ПОНЯТТЯ ТЕПЛОТЕХНІКИ	208
14. ВІДПОВІДІ	215
14.1. Основні параметри стану і закони ідеального газу	215
14.2. Суміші ідеальних газів. Теплоємність газів і газових сумішей	215
14.3. Основні функції стану. Перший закон термодинаміки	215
14.4. Термодинамічні процеси	215
14.5. Водяна пара	216
14.6. Вологе повітря	216

14.7. Витікання і дроселювання газів і пари	216
14.8. Цикли теплових енергетичних процесів	216
14.9. Цикли холодильних установок і теплових насосів	217
14.10. Паливо і його спалювання	217
14.11. Матеріальні та теплові баланси хіміко-технологічних процесів	217
 15. ДОДАТКИ	 218
15.1. Грецький алфавіт	218
15.2. Міжнародна система одиниць (СИ)	218
15.3. Десяткові приставки	219
15.4. Переведення деяких величин у одиниці системи СИ	219
15.5. Переведення одиниць вимірювання тиску	219
15.6. Основні термодинамічні параметри газів	220
15.7. Теплоємності різних газів	220
15.8. Середня теплоємність газів у межах температур від 0 до 1500 °С (лінійна залежність)	226
15.9. Властивості води	226
15.10. Властивості повітря	227
15.11. Фізичні властивості холодоагентів	228
15.12. Характеристики холодоагенту R134a на лінії насичення	228
15.13. h_s – діаграма для водяної пари	230
15.14. h_d – діаграма для повітря	231
15.15. p_h – діаграма для фреону	232
15.16. Параметри насиченої водяної пари (за температурами)	233
15.17. Параметри насиченої водяної пари (за тисками)	235
15.18. Вода і перегріта пара	241

1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ І ЗАКОНИ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ

Термодинамічна система – об'єкт, який вивчає технологічна термодинаміка. Термодинамічною системою називають будь-яку сукупність матеріальних тіл, укладених всередині заданих або довільно вибраних меж.

Усе, що перебуває поза межами термодинамічної системи, називається зовнішнім середовищем. Термодинамічні системи підрозділяються на:

- гомогенні – однорідні за складом і фізичними властивостями у всьому об'ємі;
- гетерогенні – складаються з різнорідних тіл, відділених одне від одного поверхнями розділення;
- відкриті або закриті – мають проникні (непроникні) для речовини межі;
- неізовані або ізольовані – перебувають (не перебувають) у енергетичній взаємодії із зовнішнім середовищем.

Повністю ізольованих систем у природі не буває. Бувають тільки частково ізольовані системи: теплоізовані – адіабатні, механічно ізольовані – у твердій оболонці і т.д.

Поряд з поняттям термодинамічної системи, часто використовується поняття робочого тіла – це тіло, здатне сприймати теплоту і виконувати механічну роботу (приклад: у теплових двигунах це вода і водяна пара, гази і т.п.).

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

Параметри стану – це будь-яка величина, властива тілу, зміна якої визначається тільки початковим і кінцевим станом тіла та не залежить від характеру процесу зміни його стану, за переходу тіла з першого стану в другий.

Параметри стану можна розділити на дві групи:

- інтенсивні – які не залежать від кількості речовини і при взаємодії тіл вирівнюються (температура, тиск і т.п.);
- екстенсивні – залежні від кількості речовини (маса, об'єм, внутрішня енергія і т.п.).

Вимірювання екстенсивної величини проводиться порівнянням її з такою ж за природою величиною, обраною за одиницю – еталом (метр, кілограм і т.п.). Вимірювання інтенсивної величини ґрунтується на використанні об'єктивного зв'язку між змінами цієї інтенсивної величини і будь-якої екстенсивної величини. Деякі екстенсивні величини здобувають властивості інтенсивних, якщо їх розглядають стосовно до одиниці маси даної речовини (питомі величини).

Термодинамічні параметри не завжди можуть бути виміряні приладами. Ряд параметрів, що не піддаються виміру, введені для зручності розрахунків

термодинамічних процесів. Значення цих параметрів знаходять розрахунковим шляхом. Наприклад, до них відносять ентальпію і ентропію. Такі параметри мають назву енергетичних або калоричних параметрів або функцій стану. Параметри, які можливо виміряти приладами, називаються термічними. Наприклад, до цих параметрів відносяться температура і тиск.

Поняття термічних параметрів стану відноситься до таких параметрів, які можуть бути безпосередньо виміряні за допомогою приладів. До основних термічних параметрам стану відносять: питомий об'єм, тиск і температуру.

Питомий об'єм – це об'єм 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, яка є зворотною питомому об'єму, називається густиною ($\text{кг}/\text{м}^3$):

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

На практиці часто використовують поняття питомої ваги – це вага одиниці об'єму тіла ($\text{Н}/\text{м}^3$):

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

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

Тиск – це силовий вплив (F) тіла і його частин на навколишнє середовище або оболонку та на сусідні частини того ж тіла на одиницю поверхні (S). Цей силовий вплив спрямований перпендикулярно до будь-якого елемента поверхні та урівноважується зворотно спрямованим силовим впливом навколишнього середовища, оболонки або сусіднього елемента того ж тіла.

$$P = \frac{F}{S}. \quad (1.4)$$

У системі СІ використовується одиниця тиску Паскаль (Па), це $1 \text{ Н}/\text{м}^2$, тобто сила в один Ньютон, що діє за нормаллю на площу в один квадратний метр. Для технічних вимірювань Паскаль дуже невелика величина, тому ввели кратну Паскалю одиницю тиску бар: $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$. Вибір цієї одиниці виміру тиску пояснюється тим, що атмосферний тиск повітря над поверхнею Землі приблизно рівно одному бару.

У техніці часто використовується одиниця тиску в старій системі вимірювання (СГС) – технічна атмосфера: $1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$.

Часто вимірюють тиск, особливо невеликий, висотою стовпа рідини (ртуть, вода, спирт і т.д.). Стовп рідини чинить тиск на дно ємності, обумовлений рівністю:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{H \cdot S \cdot \rho \cdot g}{S} = \rho \cdot g \cdot H, \quad (1.5)$$

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 ємності, і її площу.

На практиці висоту стовпа рідини часто беруть для оцінювання тиску. Тому метри і міліметри стовпа рідини стали одиницями вимірювання тиску. Для переходу від висоти стовпа рідини до Паскалю необхідно скористатися перекладними коефіцієнтами (див. додатки).

При визначенні тиску висотою стовпа рідини необхідно враховувати зміну її густини залежно від температури. Це необхідно робити для зіставлення результатів вимірювання тиску. Так, при визначенні атмосферного тиску за допомогою ртутного барометра його показання приводяться до 0°C виходячи зі співвідношення:

$$B_0 = B(1 - 0,000172t), \quad (1.6)$$

де B – дійсна висота ртутного стовпа барометра за температури ртуті $t^\circ\text{C}$;

B_0 – показання барометра, приведені до температури 0°C .

У розрахунках використовуються тиски стовпів рідини, приведені до температури 0°C .

Вимірювання тиску у техніці ґрунтуване на показаннях різних приладів, що діють за принципом відбиття на шкалі величини, чисельно рівної різниці тисків у місці вимірювання і тиску навколишнього середовища. Як правило, прилади мають позитивну шкалу, тобто різницю між більшим і меншим тиском. Тому вони підрозділяються на прилади для вимірювання тиску: більше атмосферного – манометри, менше атмосферного – вакуумметри.

Тиск за шкалою цих приладів називається манометричним тиском P_M і вакуумом P_B відповідно. Тиск у місці вимірювання називається абсолютним P , тиск навколишнього середовища – тиском атмосферного повітря або барометричним B , оскільки прилад, як правило, встановлений у навколишньому його атмосферним повітрі.

Розрахункові залежності тиску за приладами наступні:

– манометричний тиск:

$$P_M = P - P_{\text{бар}}, \quad (1.7)$$

де P_M – манометричний тиск (за приладом);

P – абсолютний тиск;

$P_{\text{бар}}$ – тиск атмосферного повітря (барометричний тиск);

– вакуум:

$$P_B = P_{\text{бар}} - P, \quad (1.8)$$

де P_B – вакуум (показання вакуумметру).

Параметром стану термодинамічного тіла є абсолютний тиск. При використанні приладів він визначається у залежності від типу приладу за наступними залежностями:

– для манометру:

$$P = P_M + P_{\text{бар}}, \quad (1.9)$$

– для вакуумметра:

$$P = P_{\text{бар}} - P_B. \quad (1.10)$$

Температура – являє собою міру нагрітості тіла.

У технічній термодинаміці під температурою розуміють величину, пропорційну енергії руху молекул і атомів даного тіла.

Для твердого тіла, із твердими кристалічними решітками, температура буде пропорційна внутрішній енергії коливального руху атомів у молекулі.

Для рідкого і газоподібного тіла абсолютна температура прямо пропорційна середній кінетичній енергії хаотичного руху молекули, що доводиться на одну ступінь свободи її руху (поступального).

Температура визначає напрямок переходу теплової енергії (теплоти). Тепло переходить від тіла з більш високою температурою до тіла з більш низькою температурою. Цей процес енергетичного обміну буде мимовільно протікати до повного вирівнювання температур обох тіл. При цьому у першого тіла температура буде зменшуватися, а у другого – збільшуватися до встановлення термічної рівноваги.

Температура, так само як і тиск, відноситься до інтенсивних параметрів, її вимірювання здійснюється з використанням екстенсивних властивостей речовини. Наприклад, через зміну об'єму у рідинних термометрах або електричного опору у термометрах опору, через зміну ЕРС у спаї термопари і т.п.

На практиці використовуються дві температурні шкали. Абсолютна шкала температур Кельвіна – її нижня межа відповідає точці абсолютного нуля, де відсутній молекулярний рух (практично недосяжна) і єдиною експериментальною точкою прийнята потрібна точка води, що лежить вище точки танення льоду за нормального атмосферного тиску (760 мм рт. ст.) на $0,01^{\circ}$, цій точці привласнене значення температури $273,16\text{ К}$. Це значення обране для того, щоб різниця температур кипіння і танення хімічно чистої води за нормального фізичного тиску становила 100°C . Температура у Кельвінах відповідає $^{\circ}\text{C}$ та позначається як $T, \text{ К}$.

Друга – стоградусна шкала температур Цельсію – широко використовується на практиці. Ця шкала має дві дослідні точки: 0°C і 100°C . Температура на ній позначається як $t, ^{\circ}\text{C}$. Між абсолютною температурою за шкалою Кельвіна і температурою за шкалою Цельсію є співвідношення:

$$T = t + 273,15. \quad (1.11)$$

Термодинамічно рівноважний стан тіла або системи – це такий стан теплової і механічної рівноваги елементів тіла або системи, який без зовнішнього впливу може зберігатися як завгодно довго.

Рівноважна система – це система тіл, що перебувають у термодинамічній рівновазі, а якщо ні, то вона буде називатися не рівноважною системою.

Так, без обліку гравітаційних сил рівноважний стан тіла або системи є такий їх стан, при якому по усьому їх об'єму тиск і температура мають одні значення. Рівність тільки тиску в усіх точках обумовлює механічну рівновагу, рівність температури – термічну рівновагу.

За не рівноважного стану тіла (системи) у різних його частинах можуть бути різні і температура, і тиск. Однак у не рівноважній системі можуть бути точки, у яких деякі термічні параметри однакові. Геометричне місце точок у просторі, яке займає система (тіло), з однаковими температурами являє собою ізотермічну поверхню, а з однаковим тиском – ізобаричну поверхню. Такі поверхні називаються ізопотенціальними. Ізопотенціальні поверхні не можуть перетинатися. Ізопотенціальні поверхні можуть бути і за рівноважного стану тіла. Наприклад, у високому циліндрі з рідиною на різних рівнях від його дна будуть різні ізобарні поверхні, обумовлені дією гравітаційного поля Землі. Тому рівність параметрів у рівноважній системі враховується наближено – без обліку гравітаційних сил.

Усі термодинамічні параметри гомогенної системи (однорідної – з однаковими фізичними властивостями), що перебуває у рівноважному стані, мають певний функціональний зв'язок. При відсутності дії зовнішніх полів термодинамічно рівноважний стан будь-якого однорідного реального тіла визначається всього лише двома незалежними параметрами. Для неоднорідних систем два параметри можуть взаємно визначати один одного (наприклад, тиск і температура вологої насиченої пари), у цьому випадку необхідний третій параметр.

У якості незалежних параметрів можуть бути обрані: тиск і температура, тиск і питомий об'єм або будь-яка пара незалежних властивостей (температура і ентропія, тиск і ентальпія і т.п.).

При заданих значеннях двох параметрів термодинамічно рівноважної системи можна визначити будь-які інші її параметри. Зв'язок між параметрами такої системи описується рівняннями стану. Наприклад, зв'язок між параметрами p , v , T може бути виражений термічними рівняннями стану системи:

– у неявній формі: $f(p, v, T) = 0$;

– у явній формі: $p = p(v, T)$; $v = v(p, T)$; $T = T(p, v)$.

У системі координат p , v , T ці рівняння описують поверхню, яка називається термодинамічною.

Вид функціональної залежності між різними параметрами для різних речовин може бути одержаний або дослідним шляхом, або на базі мікрофізичних теорій. Методами самої термодинаміки цей зв'язок не може бути визначений.

Взаємозв'язок властивостей однорідної речовини у рівноважному стані може також характеризуватися термічними коефіцієнтами. Ці коефіцієнти можуть бути визначені дослідним шляхом, вони мають певний фізичний зміст.

Взаємозв'язок термічних коефіцієнтів можна одержати, використовуючи

рівняння стану речовини у явному виді $P = F(v, T)$. Після перетворень одержимо:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = - \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T}. \quad (1.12)$$

У рівнянні (1.12) відношення $(\partial v / \partial P)_T$ характеризує інтенсивність зміни об'єму залежно від зміни тиску за постійної температури. Відношення цієї величини до питомого об'єму v_0 , узятим при фіксованому стані (наприклад, за нормальних умов) зі зворотним знаком, називається коефіцієнтом ізотермічного стискання і позначається як μ :

$$\mu = - \frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T. \quad (1.13)$$

Відношення $(\partial v / \partial T)_P$ характеризує інтенсивність зміни об'єму у залежності від зміни температури за постійного тиску. Розділивши його на v_0 , одержуємо коефіцієнт ізобарного розширення, який позначається як α :

$$\alpha = \frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P. \quad (1.14)$$

Відношення $(\partial P / \partial T)_v$ характеризує зміну тиску у залежності від зміни температури за постійного об'єму. Розділивши його на P_0 , одержуємо коефіцієнт пружності, який позначають як β :

$$\beta = \frac{1}{P_0} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v. \quad (1.15)$$

Рівняння взаємозв'язку термічних коефіцієнтів має наступний вигляд:

$$\beta = \frac{\alpha}{\mu P_0}. \quad (1.16)$$

Основні закони ідеального газу:

1. Закон Шарля. $V = \text{const}$.

За постійного об'єму і незмінних значень маси газу і його молярної маси, відношення тиску газу до його абсолютної температури залишається постійним: $P/T = \text{const}$.

Процес, який підкоряється закону Шарля, називається ізохорним.

2. Закон Гей-Люссака. $P = \text{const}$.

Під постійним тиском і за незмінних значень маси газу і його молярної маси, відношення об'єму газу до його абсолютної температури залишається постійним: $V/T = \text{const}$.

Процес, який підкоряється закону Гей-Люссака, називається ізобарним.

3. Закон Бойля-Маріотта. $T = \text{const}$.

За постійної температури і незмінних значень маси газу і його молярної маси, добуток об'єму газу та його тиску залишається постійним: $P \cdot V = \text{const}$.

Процес, який підкоряється закону Бойля-Маріотта, називається ізотермічним.

4. Закон Авогадро.

За однакових тисків і однакових температур, у рівних об'ємах різних ідеальних газів міститься однакове число молекул. У одному молі різних речовин міститься $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро).

5. Закон Дальтона.

Тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків газів P , що входять у неї:

$$P_{\text{сум}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (1.17)$$

Парціальний тиск P_n – тиск, який чинив би даний газ, якщо б він займав весь об'єм.

6. Об'єднаний газовий закон (закон Клапейрона).

У відповідності до закону Бойля-Маріотта і Гей-Люсака можна зробити висновок, що для даної маси газу:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

або

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{const}. \quad (1.18)$$

1.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Визначити індивідуальну газову постійну для повітря.

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо молярну масу повітря: $\mu_{\text{пов}} = 29$ г/моль.

Визначаємо індивідуальну газову постійну:

$$R_{\text{пов}} = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Відповідь. Індивідуальна газова постійна для повітря дорівнює 286,7 Дж/кг·К.

Приклад 2. Визначити густину водню за нормальних умов.

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо молярну масу водню: $\mu_{\text{H}_2} = 2,016$ г/моль.

Густина газу за нормальних умов визначається за формулою:

$$\rho^{\text{н.у.}} = \frac{\mu}{v}.$$

Враховуючи, що один моль будь-якого газу за нормальних умов займає об'єм 22,4 л, одержимо:

$$\rho_{\text{H}_2}^{\text{н.у.}} = \frac{2,016}{22,4} = 0,09 \frac{\text{г}}{\text{л}} = 0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Відповідь. Густина водню за нормальних умов складає 0,09 кг/м³.

Приклад 3. Визначити питомий об'єм кисню за нормальних умов.

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо молярну масу кисню: $\mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ г/моль}$.

Розраховуємо густину кисню за нормальних умов:

$$\rho_{\text{O}_2}^{\text{н.у.}} = \frac{32}{22,4} = 1,429 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Визначаємо питомий об'єм:

$$v_{\text{O}_2}^{\text{н.у.}} = \frac{1}{\rho_{\text{O}_2}^{\text{н.у.}}} = \frac{1}{1,429} = 0,699 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Відповідь. Питомий об'єм кисню за нормальних умов складає 0,699 м³/кг.

Приклад 4. Визначити масу метану, що міститься у балоні ємністю 2 м³ під тиском газу 40·10⁵ Па і за температури 20⁰С. Показання барометра 750 мм. рт. ст.

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо температуру і барометричний тиск у систему СІ:

$$T = 293 \text{ К};$$

$$P_{\text{бар}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Визначаємо абсолютний тиск газу:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{над}} + P_{\text{бар}} = 40 \cdot 10^5 + 1 \cdot 10^5 = 41 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

За таблицею додатку знаходимо молярну масу метану: $\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ г/моль}$.

Визначаємо індивідуальну газову постійну:

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{8314}{16} = 518,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

З рівняння стану виражаємо масу газу:

$$m = \frac{P \cdot V}{R_{\text{CH}_4} \cdot T} = \frac{41 \cdot 10^5 \cdot 2}{518,8 \cdot 293} = 53,944 \text{ кг}.$$

Відповідь. Маса газу дорівнює 53,944 кг.

Приклад 5. Визначити густину аміаку за наступних параметрів: надлишковий тиск 4 бари і температура 200 ⁰С. Барометричний тиск 760 мм. рт. ст.

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T = 473 \text{ К};$$

$$P_{\text{над}} = 4 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{бар}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Визначаємо абсолютний тиск газу:

$$P_{\text{над}} = P_{\text{над}} + P_{\text{бар}} = 4 \cdot 10^5 + 1,013 \cdot 10^5 = 5,013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

За таблицею додатку знаходимо молярну масу аміаку: $\mu_{\text{NH}_3} = 17 \text{ г/моль}$.

Визначаємо індивідуальну газову постійну:

$$R_{\text{NH}_3} = \frac{8314}{17} = 489 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

З рівняння стану виразимо відношення маси до об'єму:

$$\rho_{\text{NH}_3} = \frac{M}{V} = \frac{P_{\text{абс}}}{R_{\text{NH}_3} T} = \frac{5,013 \cdot 10^5}{489 \cdot 473} = 2,167 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Відповідь. Густина аміаку дорівнює $2,167 \text{ кг/м}^3$.

Приклад 6. Газ з тиском 4 бари і температурою 60°C має об'єм 6 м^3 . Яким буде його об'єм за нормальних умов?

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T = 333 \text{ К};$$

$$P_{\text{абс}} = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Використовуючи об'єднаний газовий закон, визначимо об'єм газу за нормальних умов:

$$V_0 = \frac{P \cdot V \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = \frac{4 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 333} = 19,48 \text{ м}^3.$$

Відповідь. Об'єм газу за нормальних умов дорівнює $19,48 \text{ м}^3$.

Приклад 7. Через трубопровід протікає 3 кг/с азоту з абсолютним тиском 3 бари і температурою 100°C , зі швидкістю 15 м/с . Визначити перетин трубопроводу.

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T = 373 \text{ К};$$

$$P_{\text{абс}} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

За таблицею додатку знаходимо молярну масу азоту: $\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ г/моль}$.

Визначаємо індивідуальну газову постійну:

$$R_{\text{N}_2} = \frac{8314}{28} = 296,929 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

З рівняння стану знайдемо об'ємну витрату:

$$\dot{V} = \frac{\dot{M} \cdot R_{\text{N}_2} \cdot T}{P_{\text{абс}}} = \frac{3 \cdot 296,929 \cdot 373}{3 \cdot 10^5} = 1,108 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Перетин трубопроводу визначимо як відношення об'ємної витрати до швидкості руху потоку:

$$f = \frac{\dot{V}}{w} = \frac{1,108}{15} = 0,0739 \text{ м}^2.$$

Відповідь. Перетин трубопроводу дорівнює $0,0739 \text{ м}^2$.

Приклад 8. Визначити об'єм вуглекислого газу, маса якого 3 кг, надлишковий тиск 50 бар, температура 100°C , барометричний тиск 750 мм. рт. ст.

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо параметри у систему СИ:

$$T = 373 \text{ К};$$

$$P_{\text{над}} = 50 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{бар}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Визначаємо абсолютний тиск газу:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{над}} + P_{\text{бар}} = 50 \cdot 10^5 + 1 \cdot 10^5 = 51 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

За таблицею додатку знаходимо індивідуальну газову постійну вуглекислого газу:

$$R_{\text{CO}_2} = 188,9 \text{ Дж/кг}^\circ\text{К}.$$

З рівняння стану знаходять об'єм:

$$V = \frac{MR_{\text{CO}_2} T}{P_{\text{абс}}} = \frac{3 \cdot 188,9 \cdot 373}{51 \cdot 10^5} = 0,041 \text{ м}^3.$$

Відповідь. Об'єм газу дорівнює $0,041 \text{ м}^3$.

1.2. Питання для самоконтролю

1. Термодинаміка, основний зміст, форми передачі енергії, механічний еквівалент теплоти.
2. Розділи термодинаміки. Які закономірності перетворення енергії у явища вивчаються у кожному розділі?
3. Поняття робочого тіла і термодинамічної системи.
4. Класифікація термодинамічних систем залежно від умов їх взаємодії з іншими системами.
5. Поняття про термодинамічні параметри стану робочого тіла.
6. Термічне рівняння стану робочого тіла, поняття про рівноважний термодинамічний процес.
7. Поняття оборотних і необоротних процесів.
8. Поняття ідеального газу.
9. Визначення температури. Шкала термодинамічної температури, шкала міжнародної практичної температури.
10. Поняття питомого об'єму газу. Поняття тиску газу. Нормальні умови стану ідеального газу.
11. Визначення тиску за молекулярно-кінетичною теорією газів, їх взаємозв'язки з об'ємом і температурою.

12. Математичні вираження взаємозв'язку тиску, об'єму і температури для 1 кг газу.
13. Закон Бойля-Маріотта.
14. Визначення числа Авогадро.
15. Закон Гей-Люссака.
16. Рівняння Менделєєва-Клапейрона для 1 кг газу.
17. Рівняння Менделєєва-Клапейрона для p кг газу. Що відображають термічні (характеристичні) рівняння стану газу?
18. Математичне вираження рівнянь Менделєєва-Клапейрона для стану ідеального газу (для 1 кг, m кг, 1 кмоль).
19. Математичне вираження рівнянь Менделєєва-Клапейрона для суміші реальних газів.

1.3. Тестові питання

1. Закон Бойля-Маріотта стверджує що:

- а) за $P = \text{const}$, $v_i/T_i = \text{const}$;
- б) за $T = \text{const}$, $v_i \cdot P_i = \text{const}$;
- в) за $V = \text{const}$, $P_i/T_i = \text{const}$;
- г) $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$.

2. Закон Гей-Люссака стверджує що:

- а) за $P = \text{const}$, $v_i/T_i = \text{const}$;
- б) за $T = \text{const}$, $v_i \cdot P_i = \text{const}$;
- в) за $V = \text{const}$, $P_i/T_i = \text{const}$;
- г) $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$.

3. Закон Шарля стверджує що:

- а) за $T = \text{const}$, $v_i \cdot P_i = \text{const}$;
- б) за $V = \text{const}$, $P_i/T_i = \text{const}$;
- в) за $P = \text{const}$, $v_i/T_i = \text{const}$;
- г) $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$.

4. Рівняння Клапейрона І виду має вигляд:

- а) $P \cdot V_\mu = \mu \cdot R \cdot T$;
- б) $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$;
- в) $P \cdot V = n \cdot \mu \cdot R \cdot T$;
- г) $P \cdot v = R \cdot T$.

5. Рівняння Менделєєва представлене виразом:

- а) $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$;
- б) $P \cdot V_\mu \cdot n = \mu \cdot R \cdot T$;
- в) $P \cdot V_\mu = \mu \cdot R \cdot T$;
- г) $P \cdot V = n \cdot \mu \cdot R \cdot T$.

6. Рівняння Менделєєва-Клапейрона представлено виразом:

- а) $Pv = RT$;
- б) $PV_{\mu} = \mu RT$;
- в) $PV_{\mu} n = n \mu RT$;
- г) $PV = n \mu RT$.

7. Рівняння стану ідеального газу записується у вигляді:

- а) $Pm = VR^T$;
- б) $Rm = VR^T$;
- в) $PV = mRT$;
- г) $TR = mPV$.

8. Величина μR називається:

- а) питомою газовою постійною;
- б) термічним коефіцієнтом корисної дії;
- в) універсальною газовою постійною;
- г) холодильним коефіцієнтом.

9. Термодинамічна система, що не обмінюється теплотою з навколишнім середовищем, називається:

- а) відкритою;
- б) закритою;
- в) ізолюваною;
- г) адіабатною.

10. Термодинамічна система, що не обмінюється з навколишнім середовищем речовиною, називається:

- а) закритою;
- б) замкненою;
- в) теплоізолюваною;
- г) ізолюваною.

11. Термодинамічна система, що не обмінюється з навколишнім середовищем ні енергією, ні речовиною, називається:

- а) адіабатною;
- б) закритою;
- в) замкненою;
- г) теплоізолюваною.

12. Термодинамічний процес, що протікає як у прямому, так і у зворотному напрямку називається:

- а) рівноважним;
- б) оборотним;
- в) не рівноважним;

г) необоротним.

13. Термодинамічний процес, у якому робоче тіло, пройшовши ряд станів, повертається у початковий стан, називається:

- а) необоротним;
- б) рівноважним;
- в) оборотним;
- г) не рівноважним.

14. Закон Авогадро стверджує, що всі ідеальні гази за однакових P і T у рівних об'ємах містять однакове число:

- а) атомів;
- б) молекул;
- в) ступеней свободи;
- г) молей.

15. Яким приладом вимірюється надлишковий тиск газу у ємності?

- а) барометром;
- б) манометром;
- в) вакуумметром;
- г) психрометром.

16. Який закон виражає залежність густини газу від температури?

- а) закон Гей-Люссака;
- б) Закон Бойля-Маріотта;
- в) Закон Клапейрона-Менделєєва;
- г) Закон Шарля.

17. За допомогою яких приладів визначається термодинамічний параметр P за умови, якщо тиск газу вище тиску навколишнього середовища?

- а) манометром і вакуумметром;
- б) вакуумметром і барометром;
- в) манометром і барометром.

18. Який закон використовується для приведення газу до нормальних умов?

- а) закон Бойля-Маріотта;
- б) об'єднаний закон Бойля-Маріотта і Гей-Люссака;
- в) закон Авогадро;
- г) закон Клапейрона-Менделєєва.

19. Яким приладом визначається тиск навколишнього середовища?

- а) барометром;
- б) манометром;

в) вакуумметром.

20. У якому стані робоче тіло найбільш здатне до перетворення тепла у роботу?

- а) у рідкому;
- б) у газоподібному.
- в) у твердому.

21. Яким приладом вимірюють розрідження газу у ємності?

- а) барометром;
- б) манометром;
- в) вакуумметром.

1.4. Задачі

Задача 1. Який об'єм займає 10 кмоль кисню за нормальних умов?

Задача 2. У циліндрі діаметром $d = 65$ см міститься повітря об'ємом $V = 0,6 \text{ м}^3$ під тиском $P_{\text{абс}} = 3$ бари, і за температури $t = 45^\circ\text{C}$. До якої температури повинне нагріватися повітря під постійним тиском, щоб поршень, який рухається без тертя, піднявся на висоту $h = 55$ см?

Задача 3. У ємності об'ємом $V_1 = 6,0 \text{ м}^3$ перебуває повітря під тиском $P_{\text{абс}} = 1,6 \text{ МН/м}^2$ і за температури $t = 55^\circ\text{C}$. Скільки повітря треба викачати з ємності, щоб розрідження у ній склало $P_{\text{роз}} = 550$ мм. рт. ст. за умови, що температура у ємності не зміниться? Атмосферний тиск за ртутним барометром дорівнює $P_{\text{бар}} = 780$ мм. рт. ст. за температури у ньому $t_1 = 28^\circ\text{C}$. Розрідження у ємності вимірювали ртутним вакуумметром за температури ртуті $t = 55^\circ\text{C}$.

Задача 4. Визначити масу вуглекислого газу у ємності об'ємом $V = 3 \text{ м}^3$ за температури $t = 75^\circ\text{C}$. Тиск газу за манометром дорівнює $P_{\text{ман}} = 0,6$ бар. Барометричний тиск $P_{\text{бар}} = 770$ мм. рт. ст.

Задача 5. У циліндрі діаметром 60 см міститься повітря $0,45 \text{ м}^3$ під тиском 2,5 бар, і за температури 35°C . До якої температури повинне нагріватися повітря під постійним тиском, щоб поршень, що рухається без тертя, піднявся на $h = 50$ см?

Задача 6. Газ перебуває у балоні об'ємом 5 м^3 за відомих тиску 2,7 бар (показання манометра) і температури 120°C . Визначити масу і густину газу.

Задача 7. У ємності перебуває повітря під розрядженням $h_{\text{вак}} = 65$ мм. рт. ст. за температури $t = 0^{\circ}\text{C}$. Ртутний барометр показує $h_{\text{бар}} = 750$ мм. рт. ст. за температури ртуті $t_1 = 18^{\circ}\text{C}$. Визначити питомий об'єм повітря за цих умов.

Задача 8. У ємності об'ємом $V = 3 \text{ м}^3$ перебуває газ (бензол C_6H_6) під надлишковим тиском $P_{\text{над}} = 700 \text{ кПа}$ і за температури $T = 340 \text{ К}$.

Визначити:

- абсолютний тиск газу у ємності $P_{\text{абс}}$;
- значення газової постійної R для даного газу;
- масу газу M у ємності;
- об'єм газу V_n за нормальних умов;
- питомий об'єм і густину газу за заданих умов (v, ρ);
- питомий об'єм і густину газу за нормальних умов (v_n, ρ_n).

Барометричний тиск складає $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Задача 9. Початковий стан азоту заданий параметрами: $t = 200^{\circ}\text{C}$, $v = 1,9 \text{ м}^3/\text{кг}$. Азот нагрівається у процесі під постійним тиском, причому об'єм азоту збільшується втричі. Визначити кінцеву температуру.

Задача 10. У циліндрі з рухливим поршнем перебуває кисень за температури $t = 80^{\circ}\text{C}$ і розрідженні, яке дорівнює 320 мм. рт. ст. За постійної температури кисень стискається до надлишкового тиску $P_{\text{над}} = 12 \text{ кг/см}^2$. Барометричний тиск дорівнює 745 мм. рт. ст. У скільки разів зменшиться об'єм кисню?

Задача 11. Абсолютний тиск азоту у ємності за кімнатної температури ($t = 20^{\circ}\text{C}$) складає $P = 22$ бари. У ємності азот нагрівають, причому відомо, що граничний надлишковий тиск, при якому можлива безпечна робота, становить 60 бар. Визначити температуру, до якої можливе нагрівання азоту. Барометричний тиск дорівнює 750 мм. рт. ст.

Задача 12. Визначити густину повітря і водню за нормальних умов.

Задача 13. Відомо, що 1 кмоль газу містить $6,023 \cdot 10^{26}$ молекул. Нехай є ємність об'ємом 1 м^3 , у якій створений повний вакуум, тобто з цієї ємності вилучені всі молекули. У стінці ємності зроблений отвір такого розміру, що з навколишнього повітря у ємність проникають молекули зі швидкістю 100000 молекул у секунду. Визначити, скільки часу буде потрібно, щоб густина повітря у розглянутому об'ємі стала рівною густині навколишнього повітря, якщо навколишнє повітря перебуває за нормальних умов, а швидкість проникнення молекул залишається незмінною.

Задача 14. Паротурбінна установка потужністю 100000 кВт витрачає 0,37 кг палива на 1 кВт·год. Яка повинна бути сумарна масова

продуктивність (кг/год) вентиляторів, що подають повітря на опалення реактора, якщо для спалювання 1 кг палива потрібно 15 м^3 повітря за нормальних умов?

Задача 15. Визначити масу повітря, що перебуває у кімнаті площею 25 м^2 і висотою $3,2 \text{ м}$. Прийняти, що температура повітря у кімнаті дорівнює $t = 22^\circ\text{C}$, а барометричний тиск рівний $986,5 \text{ мбар}$.

Задача 16. Визначити густину азоту під абсолютними тисками $P_1 = 10$ і $P_2 = 60 \text{ ат}$. Температура азоту дорівнює $t = 400^\circ\text{C}$.

Задача 17. Обчислити універсальну газову постійну у Дж/(кмоль·град), знаючи, що у технічній системі одиниць газова постійна дорівнює $\mu R = 847,83 \text{ кг}\cdot\text{м}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$.

Задача 18. Густина повітря за нормальних умов дорівнює $\rho = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$. Чому рівна густина повітря за параметрів: $t = 20^\circ\text{C}$ і $P = 15 \text{ бар}$?

Задача 19. Вимірювання об'ємів газів може надати відомості про будову молекул газу. Визначити, чи є дійсно молекула кисню двохатомною молекулою, якщо відомо, що у об'ємі, рівному 4 л , перебуває 5 г кисню за температури $t = 150^\circ\text{C}$, а тиск кисню дорівнює $1,373 \text{ бар}$. Визначити, чому був би рівний тиск газу, якби молекула складалася із трьох атомів кисню (озон – O_3)?

Задача 20. За експериментального дослідження питомих об'ємів пари рідин визначають масу пари, що перебуває у вимірювальній ємності (п'єзометрі) об'ємом V . Для цього пару конденсують і випускають до бюксу та зважують. Однак під атмосферним тиском у п'єзометрі залишається деяка кількість речовини, масу якої необхідно врахувати. Це з успіхом виконується за допомогою формул для ідеального газу. Визначити масу речовини, що залишилась у п'єзометрі, якщо відомо, що об'єм п'єзометра дорівнює $V = 420 \text{ см}^3$, температура складає $t = 320^\circ\text{C}$, а тиск дорівнює $P = 1,02 \text{ бар}$. Досліджуваною речовиною є етиловий спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Задача 21. Для експериментального визначення питомого об'єму реальних газів досить часто користуються методом гідростатичного зважування, вимірюючи у досліді силу, що виштовхує поплавець, поміщений у стиснений газ. Однак при розрахунках чутливості обладнання, що вимірює силу виштовхування, доводиться приблизно оцінювати величину цієї сили. У деяких випадках для такої оцінки можна скористатися формулами для ідеального газу. Розрахувати, користуючись формулами для ідеального газу, яку силу виштовхування, буде випробовувати поплавець об'ємом 8 см^3 у вуглекислому газі за температури $t = 700^\circ\text{C}$ і під тиском $P = 600 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Задача 22. Кисень має об'єм $V_n = 0,3 \text{ м}^3$ за нормальних умов. У цей час кисень перебуває у ємності ємністю 650 см^3 . Визначити показання манометра, що вимірює тиск у цій ємності, якщо температура кисню дорівнює $t = 200^\circ\text{C}$. Атмосферний тиск рівний $P = 762 \text{ мм. рт. ст.}$

Задача 23. За температури $t = 800^\circ\text{C}$ і під тиском $P = 750 \text{ мм. рт. ст.}$ густина газу дорівнює $\rho = 0,44764 \text{ кг/м}^3$. Що це за газ?

Задача 24. Маса порожнього балону для аргону ємністю 40 л дорівнює 64 кг . Скільки буде важити балон з аргоном, якщо за температури $t = 15^\circ\text{C}$ балон наповнюють газом під тиском $P = 150 \text{ атм}$? Як зміниться тиск аргону, якщо балон внести у приміщення, де температура складає $t = 25^\circ\text{C}$?

Задача 25. У ємності об'ємом 5 м^3 перебуває повітря під барометричним тиском $B = 1000 \text{ мбар}$ і за температури 300°C . Потім повітря викачується доти, поки у ємності не утвориться вакуум, рівний 600 мм. рт. ст. Температура повітря після викачування залишається сталою. Скільки повітря (у кг) було викачане? Чому буде дорівнювати тиск у ємності після викачування, якщо повітря, яке залишилося, остудили до температури $t = 20^\circ\text{C}$.

Задача 26. За точного зважування на аналітичних вагах доводиться вводити поправку на те, що тіло, яке зважується, і гирі, перебувають під дією різних сил з боку повітря. Яка маса води у бюксі, що зважується на аналітичних вагах, якщо за рівноваги терезів на їх чашку поставлені гирі загальною масою $20,563 \text{ г}$? Густина матеріалу гир дорівнює $8,4 \text{ г/см}^3$, а густина води разом з бюксою – $1,2 \text{ г/см}^3$. Зважування виконане у повітрі за температури $t = 20^\circ\text{C}$ і під барометричним тиском $B = 755 \text{ мм. рт. ст.}$

2. СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ ГАЗІВ І ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

Під газовою сумішшю розуміють суміш окремих газів, що не вступають між собою у хімічну взаємодію. Кожний газ (компонент) у суміші незалежно від інших газів повністю зберігає усі свої властивості та поводить ся так, ніби він один займає увесь об'єм суміші.

Парціальний тиск – це тиск, який мав би кожний газ, що входить до складу суміші, якби цей газ перебував один у тій же кількості, у тому ж об'ємі та при тій же температурі, що і у суміші.

Газова суміш підкоряється закону Дальтона: Загальний тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків окремих газів, складових суміші.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum P_i, \quad (2.1)$$

де $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ – парціальні тиски.

Склад суміші задається об'ємними, масовими і мольними долями, які визначаються відповідно наступним формулам:

$$r_1 = V_1 / V_{\text{сум}}; r_2 = V_2 / V_{\text{сум}}; \dots; r_n = V_n / V_{\text{сум}}; \quad (2.2)$$

$$g_1 = m_1 / m_{\text{сум}}; g_2 = m_2 / m_{\text{сум}}; \dots; g_n = m_n / m_{\text{сум}}; \quad (2.3)$$

$$r_1' = v_1 / v_{\text{сум}}; r_2' = v_2 / v_{\text{сум}}; \dots; r_n' = v_n / v_{\text{сум}}. \quad (2.4)$$

де $V_1; V_2; \dots; V_n; V_{\text{сум}}$ – об'єми компонентів і суміші;

$m_1; m_2; \dots; m_n; m_{\text{сум}}$ – маси компонентів і суміші;

$v_1; v_2; \dots; v_n; v_{\text{сум}}$ – кількості речовини (кіломолі) компонентів і суміші.

Для ідеального газу за законом Дальтона:

$$r_1 = r_1'; r_2 = r_2'; \dots r_n = r_n'. \quad (2.5)$$

Так як $V_1 + V_2 + \dots + V_n = V_{\text{сум}}$ та $m_1 + m_2 + \dots + m_n = m_{\text{сум}}$, то :

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1; \quad (2.6)$$

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1. \quad (2.7)$$

Зв'язок між об'ємними і масовими долями наступний:

$$g_1 = r_1 \cdot \mu_1 / \mu_{\text{сум}}; g_2 = r_2 \cdot \mu_2 / \mu_{\text{сум}}; \dots; g_n = r_n \cdot \mu_n / \mu_{\text{сум}}, \quad (2.8)$$

де: $\mu_1, \mu_2, \dots \mu_n, \mu_{\text{сум}}$ – молекулярні маси компонентів і суміші.

Молекулярна маса суміші визначається:

$$\mu_{\text{сум}} = \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2 + \dots + \mu_n r_n. \quad (2.9)$$

Газова постійна суміші визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} R_{\text{сум}} &= g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n = R_{\mu} (g_1 / \mu_1 + g_2 / \mu_2 + \dots + g_n / \mu_n) = \\ &= 1 / (r_1 / R_1 + r_2 / R_2 + \dots + r_n / R_n). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Масові теплоємності суміші:

$$c_{p \text{ сум.}} = g_1 c_{p1} + g_2 c_{p2} + \dots + g_n c_{pn}; \quad (2.11)$$

$$c_{v \text{ сум.}} = g_1 c_{v1} + g_2 c_{v2} + \dots + g_n c_{vn}. \quad (2.12)$$

Молярні (молекулярні) теплоємності суміші:

$$C_{pm \text{ сум.}} = r_1 C_{pm1} + r_2 C_{pm2} + \dots + r_n C_{pmn}; \quad (2.13)$$

$$C_{vm \text{ сум.}} = r_1 C_{vm1} + r_2 C_{vm2} + \dots + r_n C_{vnm}. \quad (2.14)$$

Теплоємність тіла – відношення кількості теплоти, підведеної (або відведеної) у термодинамічному процесі, до зміни температури:

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (2.15)$$

де dQ – елементарна кількість теплоти;

dT – елементарна зміна температури.

Теплоємність чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно підвести до системи, щоб при заданих умовах підвищити її температуру на 1 градус. Одиницею кількості теплоти у системі СІ є Джоуль, а температури – Кельвін, тоді одиницею теплоємності буде Дж/К.

Залежно від зовнішніх умов і характеру термодинамічного процесу теплота dQ може або підводитись до робочого тіла, або виділятися від нього. Тому теплоємність може мати, як позитивне, так і негативне значення.

Значення теплоємності залежить від процесу, у якому вона визначається. Тому звичайно при теплоємності C вказується індекс "х", який характеризує вид процесу теплообміну:

$$C_x = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right). \quad (2.16)$$

Індекс "х" означає, що процес підведення (або відведення) теплоти відбувається за постійного значенні будь-якого з параметрів, наприклад, тиску, об'єму або інших. Залежно від кількісної одиниці тіла, до якого підводиться теплота, у термодинаміці розрізняють масову, об'ємну і мольну теплоємності.

Масова теплоємність – це кількість теплоти, яку необхідно підвести до одиниці маси речовини, щоб нагріти її на одиницю температури:

$$c = \frac{C}{m}. \quad (2.17)$$

Одиницею вимірювання масової теплоємності є Дж/(кг·К). Масову теплоємність називають також питомою теплоємністю.

Об'ємна теплоємність – теплоємність, віднесена до одиниці об'єму робочого тіла:

$$c' = \frac{C}{V} = c \cdot \rho \quad (2.18)$$

де V і ρ – об'єм і густина тіла за нормальних фізичних умов.

Об'ємна теплоємність вимірюється у Дж/(м³·К).

Мольна теплоємність – теплоємність, віднесена до кількості робочого тіла (газу) у молях:

$$C_\mu = \frac{C}{n} \quad (2.19)$$

де n – кількість газу у молях.

Мольну теплоємність вимірюють у Дж/(моль·К).

Масова і мольна теплоємності пов'язані наступним співвідношенням:

$$c = \frac{C_\mu}{\mu}. \quad (2.20)$$

де μ – молекулярна маса.

Об'ємна теплоємність газів виражається через мольну теплоємність наступним чином:

$$c' = \frac{C_\mu}{V_\mu}. \quad (2.21)$$

де $V_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{моль}$ – мольний об'єм газу за нормальних умов.

Враховуючи, що теплоємність непостійна, а залежить від температури та інших термодинамічних параметрів, розрізняють дійсну і середню теплоємності.

Під дійсною теплоємністю розуміють відношення елементарної кількості теплоти, яка надається термодинамічній системі у будь-якому процесі до нескінченно малого збільшення температури цієї системи, викликаному наданою теплотою.

Якщо прагнуть підкреслити залежність теплоємності робочого тіла від температури, то записують її як $C(t)$, а питому – як $c(t)$.

Середню питому теплоємність робочого тіла при зміні його температури від t_1 до t_2 можна визначити як:

$$c_{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} c(t) \cdot dt \quad (2.22)$$

Звичайно у таблицях наводяться середні значення теплоємності $c_{сер}$ для різних інтервалів температур, що починаються з $t_1 = 0^\circ\text{C}$. Тому в усіх випадках, коли термодинамічний процес проходить у інтервалі температур від t_1 до t_2 , у якому $t_1 \neq 0$, кількість питомої теплоти процесу q визначається з використанням табличних значень середніх теплоємностей c_{cp} у такий спосіб:

$$q = c_{cp2} \cdot t_2 - c_{cp1} \cdot t_1 \quad (2.23)$$

Значення середніх теплоємностей c_{cp1} і c_{cp2} , знаходять за таблицями (дивись додати).

Особливий інтерес представляють середні і дійсні теплоємності у процесах за постійного об'єму c_v (ізохорна теплоємність, рівна відношенню питомої кількості теплоти у ізохорному процесі до зміни температури робочого тіла dt) і під постійним тиском c_p (ізобарна теплоємність, рівна відношенню питомої кількості теплоти у ізобарному процесі до зміни температури робочого тіла dt).

Для ідеальних газів зв'язок між ізобарною та ізохорною теплоємностями встановлюється рівнянням Майера:

$$c_p - c_v = R. \quad (2.24)$$

Рівняння Майера свідчить, що ізобарна теплоємність більше ізохорної на значення питомої характеристичної постійної ідеального газу. Це пояснюється тим, що у ізохорному процесі зовнішня робота не виконується і теплота витрачається тільки на зміну внутрішньої енергії робочого тіла, тоді як у ізобарному процесі теплота витрачається не тільки на зміну внутрішньої

енергії робочого тіла, що залежить від його температури, але і на здійснення їм зовнішньої роботи.

Для реальних газів $c_p - c_v > R$, тому що при їх ізобарному розширенні відбувається робота не тільки проти зовнішніх сил, але і внутрішня робота проти сил взаємодії між молекулами газу, на що додатково витрачається теплота.

У теплотехніці широко застосовується відношення теплоємностей яке зветься коефіцієнта Пуассона (показника адиабати):

$$\frac{c_p}{c_v} = k, \quad (2.25)$$

Теплоємності c_p і c_v залежать від температури, отже, і показник адиабати k повинен залежати від температури.

Відомо, що з підвищенням температури теплоємність c_v збільшується. Тому з ростом температури коефіцієнт Пуассона зменшується, наближаючись до одиниці. Однак завжди залишається більше одиниці. Звичайно залежність показника адиабати від температури виражається формулою наступного вигляду:

$$k = k_0 - \alpha \cdot t, \quad (2.26)$$

де k_0 – значення коефіцієнта за температури 0°C ;

α – коефіцієнт, що має для кожного газу своє постійне значення.

Крім того, можна встановити наступні залежності, що широко використовуються:

$$c_v = \frac{R}{k-1};$$

та

$$c_p = \frac{k \cdot R}{k-1}. \quad (2.27)$$

Дані про теплоємності різних газів наводяться у табличній формі (додатоки). Звичайно у таблицях наводять значення мольної дійсної та середньої теплоємності для різних температур під постійним тиском і за постійного об'єму. Вказують також середні масові та об'ємні теплоємності за постійного об'єму і постійного тиску.

Мольна теплоємність вказується у $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$, масова – у $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, об'ємна – у $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. При цьому значення об'ємної теплоємності відносять до маси газу, що міститься у 1 м^3 за нормальних фізичних умов.

Для газів, масова теплоємність яких залежить як від температури, так і від тиску, приводять значення питомого об'єму і ентальпії 1 кг газу за різних тисків і температур. З такого роду залежностями доводиться мати справу при вивченні властивостей водяної пари.

Теплоємність газової суміші обчислюється за складом газової суміші та теплоємностями окремих газів, що входять у дану газову суміш. Газова суміш може бути задана масовим, об'ємним і молярним складом.

Теплоємність суміші газів, заданої масовими частками (масова теплоємність суміші), дорівнює сумі добутків масових часток на масову теплоємність кожного газу:

$$c_{cm} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i \quad (2.28)$$

де g_i – масова частка i -го газу, що входить у суміш.

Теплоємність суміші газів, заданої об'ємними частками визначається аналогічно:

$$c_{cm} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c'_i \quad (2.29)$$

де r_i – об'ємна частка i -го газу, що входить у суміш.

2.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Визначити молекулярну масу суміші, заданої у об'ємних відсотках: $r_{H_2} = 40\%$; $r_{CO} = 15\%$; $r_{N_2} = 42\%$; $r_{CO_2} = 3\%$.

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо молярні маси газів, що входять у суміш:

$\mu_{H_2} = 2$ г/моль;

$\mu_{CO} = 28$ г/моль;

$\mu_{N_2} = 28$ г/моль;

$\mu_{H_2} = 44$ г/моль.

Визначаємо молекулярну масу суміші газів:

$\mu_{сум} = \sum \mu_i r_i = 2 \cdot 0,4 + 28 \cdot 0,15 + 28 \cdot 0,42 + 44 \cdot 0,03 = 18,08$ г.

Відповідь. Молекулярна маса суміші газів дорівнює 18,08 г.

Приклад 2. Визначити питому газову постійну суміші, заданої масовими частками: $g_{O_2} = 0,072$; $g_{N_2} = 0,888$; $g_{CO_2} = 0,04$.

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо питомі газові постійні для газів, що входять у суміш:

$R_{O_2} = 259,8$ Дж/кг·К;

$R_{N_2} = 296,8$ Дж/кг·К;

$R_{CO_2} = 188,9$ Дж/кг·К.

Визначаємо питому газову постійну суміші:

$R_{сум} = \sum g_i R_i = 0,072 \cdot 259,8 + 0,888 \cdot 296,8 + 0,04 \cdot 188,9 = 289,919 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Відповідь. Питома газова постійна суміші дорівнює 289,919 Дж/кг·К.

Приклад 3. Визначити густину газової суміші, заданої об'ємними відсотками, що перебуває під тиском $3 \cdot 10^5$ Па і за температури 200°C : $r_{\text{H}_2} = 50\%$; $r_{\text{CO}} = 24\%$; $r_{\text{N}_2} = 5\%$; $r_{\text{CO}_2} = 14\%$; $r_{\text{CH}_4} = 7\%$.

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо температуру у систему СІ:

$$T = 473 \text{ К.}$$

За таблицею додатку знаходимо молярні маси газів, що входять у суміш:

$$\mu_{\text{H}_2} = 2 \text{ г/моль;}$$

$$\mu_{\text{CO}} = 28 \text{ г/моль;}$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ г/моль;}$$

$$\mu_{\text{H}_2} = 44 \text{ г/моль;}$$

$$\mu_{\text{CH}_4} = 16 \text{ г/моль.}$$

Визначаємо молекулярну масу суміші газів:

$$\mu_{\text{сум}} = \sum \mu_i r_i = 2 \cdot 0,5 + 16 \cdot 0,07 + 28 \cdot 0,24 + 44 \cdot 0,14 + 28 \cdot 0,05 = 16,3 \text{ г.}$$

Визначаємо питому газову постійну суміші:

$$R_{\text{сум}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{8314}{16,3} = 510 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Визначаємо густину суміші газів:

$$\rho_{\text{сум}} = \frac{P}{R_{\text{сум}} T} = \frac{3 \cdot 10^5}{510 \cdot 473} = 1,905 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Відповідь. Густина суміші газів дорівнює $1,905 \text{ кг/м}^3$.

Приклад 4. Визначити питомий об'єм газової суміші, що перебуває під атмосферним тиском 750 мм. рт. ст. і за температури 1000°C . Склад суміші заданий масовими частками: $g_{\text{CO}} = 0,24$; $g_{\text{N}_2} = 0,52$; $g_{\text{CO}_2} = 0,06$; $g_{\text{H}_2} = 0,18$.

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо тиск і температуру у систему СІ:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

$$T = 1273 \text{ К.}$$

За таблицею додатку знаходимо питомі газові постійні для газів, що входять у суміш:

$$R_{\text{CO}} = 296,8 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К;}$$

$$R_{\text{N}_2} = 296,8 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К;}$$

$$R_{\text{CO}_2} = 188,9 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К;}$$

$$R_{\text{H}_2} = 4157 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К.}$$

Визначаємо питому газову постійну суміші:

$$\begin{aligned} R_{\text{сум}} &= \sum g_i R_i = 0,52 \cdot 296,8 + 0,06 \cdot 188,9 + 0,24 \cdot 296,8 + 0,18 \cdot 4157 = \\ &= 985,162 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Визначаємо питомий об'єм суміші:

$$v_{\text{сум}} = \frac{R_{\text{сум}} T}{P} = \frac{985,15 \cdot 1273}{1 \cdot 10^5} = 125,4 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Відповідь. Питомий об'єм суміші газів дорівнює $125,4 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Приклад 5. Визначити середню масову теплоємність повітря за $\nu = \text{const}$ у межах температур від 200 до 600°C .

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо масову ізохорну теплоємність повітря для заданих температур:

$$c_{\nu}|_0^{200} = 0,7243 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

$$c_{\nu}|_0^{600} = 0,7624 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

Визначаємо середню теплоємність за формулою:

$$c_{\nu}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{\nu}|_0^{t_2} t_2 - c_{\nu}|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1};$$

$$c_{\nu}|_{200}^{600} = \frac{0,7624 \cdot 600 - 0,7243 \cdot 200}{600 - 200} = 0,781 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Відповідь. Середня масова теплоємність повітря за постійного об'єму дорівнює $0,781 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$.

Приклад 6. Визначити середню об'ємну теплоємність кисню за $P = \text{const}$ у межах температур від 500 до 1200°C .

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо об'ємну ізобарну теплоємність кисню для заданих температур:

$$c'_p|_0^{500} = 1,398 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К};$$

$$c'_p|_0^{1200} = 1,5006 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}.$$

Визначаємо середню теплоємність:

$$c'_p|_{500}^{1200} = \frac{1,5006 \cdot 1200 - 1,398 \cdot 500}{1200 - 500} = 1,5738 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Відповідь. Середня об'ємна теплоємність повітря за постійного тиску дорівнює $1,5738 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$.

Приклад 7. Визначити кількість теплоти, яку необхідно підвести до 3 м^3 азоту під тиском 2 бари у ізохорному процесі, щоб нагріти його від 600 до 900°C .

Розв'язання.

За таблицею додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T_1 = 873 \text{ К}; T_2 = 1473 \text{ К}; P_{\text{абс}} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

За таблицею додатку знаходимо об'ємну ізохорну теплоємність азоту для заданих температур:

$$c'_{v|0}^{600} = 0,9743 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К};$$

$$c'_{v|0}^{900} = 1,0136 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}.$$

Визначаємо середню теплоємність:

$$c'_{v|600}^{900} = \frac{1,0136 \cdot 900 - 0,9743 \cdot 600}{900 - 600} = 1,0922 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Використовуючи об'єднаний газовий закон, визначимо об'єм газу за нормальних умов:

$$V_0 = \frac{PVT_0}{P_0T_1} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 873} = 1,852 \text{ м}^3.$$

Визначаємо кількість теплоти:

$$Q_v = V_0 c'_v (t_2 - t_1) = 1,852 \cdot 1,0922 \cdot (900 - 600) = 606,826 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Кількість теплоти дорівнює 606,826 кДж.

Приклад 8. Визначити кількість теплоти, яку необхідно відвести від 5 кг кисню у ізохорному процесі, щоб охолодити його від 600 до 300°С. Теплоємність вважати постійною.

Розв'язання.

За таблицею додатку знаходимо молярну теплоємність і молярну масу кисню: $\mu c_v = 20,93 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$; $\mu = 32 \text{ г/моль}$.

Тоді масова теплоємність за постійного об'єму буде дорівнювати:

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,93}{32} = 0,65 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Визначаємо кількість теплоти:

$$Q = M c_v (t_2 - t_1) = 5 \cdot 0,65 \cdot (300 - 600) = -975 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Кількість теплоти дорівнює 975 кДж.

2.2. Питання для самоконтролю

1. Що таке газова суміш, парціальний тиск та об'ємні ділі?
2. Який зв'язок між об'ємними і масовими долями?
3. Що таке теплоємність?
4. Як називається теплоємність залежно від одиниць вимірювання кількості газу у системі СІ?
5. Як залежить теплоємність ідеальних газів від температури?
6. Від чого залежить теплоємність ідеальних газів?
7. Від чого залежить теплоємність реальних газів?
8. Який зв'язок між дійсною і середньою теплоємностями? Як обчислити теплоту процесу за допомогою кожної з цих теплоємностей?
9. Які властивості мають теплоємності ідеального газу?
10. Як пов'язані ізобарна та ізохорна теплоємності ідеального газу?

11. У якій формі може бути задана залежність теплоємності ідеального газу від температури?
12. Який процес відбувається після адіабатичного розширення газу за проведення досліду?

2.3. Тестові питання

1. Як позначається середня масова теплоємність за $P = \text{const}$?

- а) C_{pm} ;
- б) C_{vm} ;
- в) C'_{pm} ;
- г) C_{vm} .

2. Як позначається середня об'ємна теплоємність при $v = \text{const}$?

- а) C_{pm} ;
- б) C_{vm} ;
- в) C'_{pm} ;
- г) C_{vm} .

3. Питомі масова теплоємність визначається за формулою:

- а) $\mu c = \frac{dQ}{n \cdot dt}$;
- б) $C = \frac{dQ}{dt}$;
- в) $c = \frac{dQ}{m \cdot dt}$;
- г) $c' = \frac{dQ}{V \cdot dt}$.

4. Питомі об'ємна теплоємність визначається за формулою:

- а) $c = \frac{dQ}{m \cdot dt}$;
- б) $c' = \frac{dQ}{V \cdot dt}$;
- в) $\mu c = \frac{dQ}{n \cdot dt}$;
- г) $C = \frac{dQ}{dt}$.

5. Питомі молярна теплоємність визначається за формулою:

- а) $\mu c = \frac{dQ}{n \cdot dt}$;

$$\text{б) } c' = \frac{dQ}{V \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{в) } c = \frac{dQ}{m \cdot dt};$$

$$\text{г) } C = \frac{dQ}{dt}.$$

6. Середня питома масова теплоємність визначається за формулою:

$$\text{а) } \bar{c}' = \frac{dQ}{V \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{б) } \bar{\mu c} = \frac{dQ}{n \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{в) } \bar{c} = \frac{dQ}{m \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{г) } C = \frac{dQ}{dt}.$$

7. Дійсна питома молярна теплоємність визначається за формулою:

$$\text{а) } \bar{c} = \frac{dQ}{m \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{б) } \bar{c}' = \frac{dQ}{V \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{в) } \bar{\mu c} = \frac{dQ}{n \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$\text{г) } \bar{C} = \frac{dQ}{dt}.$$

8. Теплоємність, що визначається під постійним тиском називається:

а) ізохорною;

б) ізобарною;

в) дійсною;

г) середньою.

9. Закон Майєра стверджує що:

$$\text{а) } \mu c_v = 4,115 \cdot z;$$

$$\text{б) } \mu c_p = \mu c_v + \mu R;$$

$$\text{в) } c_p + c_v = R;$$

$$\text{г) } k = \frac{\mu C_p}{\mu C_v} = \frac{C_p}{C_v}.$$

10. Рівняння для розрахунків питомої молярної ізохорної теплоємності має вигляд:

а) $\mu c_p = k \cdot \mu c_v$;

б) $\mu c_p = \mu c_v + \mu R$;

в) $\mu c = \frac{dQ}{n \cdot dt}$;

г) $\mu c_v = 4,115 \cdot z$.

11. Вираз для визначення питомої масової теплоємності суміші має вигляд:

а) $c'_{\text{сум}} = \sum_1^n r_i \cdot c'_i$;

б) $c_{\text{сум}} = \sum_1^n g_i \cdot c_i$;

в) $\mu c_{\text{сум}} = \sum_1^n \chi_i \cdot \mu c_i$;

г) $c = \frac{\partial Q}{m \cdot dt}$.

12. Вираз для визначення питомої об'ємної теплоємності суміші має вигляд:

а) $c'_{\text{сум}} = \sum_1^n r_i \cdot c'_i$;

б) $\mu c_{\text{сум}} = \sum_1^n \chi_i \cdot \mu c_i$;

в) $c = \frac{dQ}{V \cdot dt}$;

г) $c_{\text{сум}} = \sum_1^n g_i \cdot c_i$.

13. Вираз для визначення питомої молярної теплоємності суміші має вигляд:

а) $\mu c = \frac{dQ}{n \cdot dt}$;

б) $c_{\text{сум}} = \sum_1^n g_i \cdot c_i$;

в) $\mu c_{\text{сум}} = \sum_1^n \chi_i \cdot \mu c_i$;

$$г) c'_{\text{сум}} = \sum_1^n r_i \cdot c'_i.$$

2.4. Задачі

Задача 1. Визначити газову постійну, молекулярну масу, густину і питомий об'єм за нормальних умов для суміші ідеальних газів, об'ємний вміст яких наступний: $N_2 - x\%$, $H_2 - y\%$, $CO_2 - z\%$. Знайти також середні теплоємності цієї суміші під постійним тиском P_1 у інтервалі температур від t_1 до t_2 і визначити кількість теплоти для ізобарного нагрівання m кг газової суміші від t_1 до t_2 , якщо заданий об'єм цієї суміші $V_{\text{сум}}$. Дані для розрахунків наступні:

№ вар.	P_1 , бар	$V_{\text{сум}}$, м ³	t_1 , °C	t_2 , °C	Об'ємний склад газової суміші, %		
					N_2	H_2	CO_2
1	4	30	30	60	50	5	45
2	3	35	32	62	45	5	50
3	5	40	34	64	40	10	50
4	4	45	36	66	35	10	55
5	3	25	40	70	30	30	40

Задача 2. Суміш ідеальних газів складається з 15 кг CO_2 , 12 кг N_2 і 3 кг O_2 . Об'єм суміші у початковому стані $V_1 = 20$ м³, а тиск $P_1 = 0,1$ МПа. У результаті адіабатного стискання температура суміші зростає до $t_2 = 327$ °C. Визначити температуру суміші у початковому стані, об'єм і тиск суміші у кінцевому стані, роботу стискання і зміну внутрішньої енергії суміші. Вважати, що теплоємність газів не залежить від температури і визначається за таблицею. Визначити парціальний тиск газів, що входять у суміш, у кінцевому стані. Зобразити процес на PV– і TS–діаграмах.

Гази	μC_V	μC_P
Одноатомні	12,5	20,8
Двоатомні	20,8	29,1
Трьох і багатоатомні	29,1	37,4

Задача 3. Визначити масовий склад газової суміші, що містить двоокис вуглецю та аргон, якщо відомо парціальний тиск одного з газів $P_{CO_2} = 4$ бар, і тиск усієї суміші $P_{\text{сум}} = 7$ бар. Газові постійні для кожного газу знаходять за довідниками.

Задача 4. Суміш газів має наступний об'ємний склад: $V_{O_2} = 16\%$, $V_{CO_2} = 18\%$ і деяку кількість азоту. Визначити молекулярну масу суміші $\mu_{\text{сум}}$, газову постійну суміші $R_{\text{сум}}$, питомий об'єм суміші $V_{\text{сум}}$, густину суміші $\rho_{\text{сум}}$, парціальні тиски компонентів, що входять у суміш під заданим тиском $P_{\text{сум}} = 740$ мм. рт. ст. Визначити середню об'ємну теплоємність заданої суміші за

ізобарного (ізохорного) нагрівання від $t_1 = 160^\circ\text{C}$ до $t_2 = 700^\circ\text{C}$, вважаючи залежність теплоємності від температури нелінійною. Середні об'ємні теплоємності для різних газів за нелінійної залежності теплоємності від температури, у ізобарному ($P = \text{const}$) та ізохорному ($V = \text{const}$) процесах знаходять за довідниками.

Задача 5. Суміш газів має наступний масовий склад: $M_{\text{CO}_2} = 60\%$, $M_{\text{N}_2} = 30\%$ і деяку кількість кисню. Визначити молекулярну масу суміші $\mu_{\text{сум}}$; газову постійну суміші $R_{\text{сум}}$, парціальні тиски компонентів, що входять у суміш під заданим тиском суміші $P_{\text{сум}} = 750$ мм. рт. ст., питомий об'єм суміші, і середню масову теплоємність заданої суміші за ізобарного (ізохорного) нагрівання від $t_1 = 150^\circ\text{C}$ до $t_2 = 450^\circ\text{C}$, вважаючи залежність теплоємності від температури нелінійною. Молекулярні маси, густина і об'єми за нормальних умов і газові постійні наведені у відповідних таблицях. Середні масові теплоємності для різних газів за нелінійної залежності теплоємності від температури, у ізобарному ($P = \text{const}$) та ізохорному ($V = \text{const}$) процесах знаходять за довідниками.

Задача 6. У ємності перебуває суміш повітря і вуглекислоти. Об'єм ємності $V = 0,6$ м³ кількість повітря $m_1 = 3$ кг, вуглекислоти $m_2 = 5$ кг; температура суміші $t_{\text{сум}} = 25^\circ\text{C}$. Знайти парціальні тиски компонентів P_1 , газову постійну суміші $R_{\text{сум}}$ і тиск суміші $P_{\text{сум}}$.

Задача 7. Суміш ідеальних газів складається з 20 кг N_2 , 16 кг CO_2 і 4 кг O_2 . Параметри суміші у початковому стані наступні: $P_1 = 0,1$ МПа і $t_1 = 60^\circ\text{C}$. У результаті адіабатного стискання тиск суміші зростає до значення $P_2 = 0,5$ МПа. Визначити об'єм суміші у початковому і кінцевому станах, температуру і густину суміші у кінцевому стані, роботу стискання і зміну внутрішньої енергії суміші. Вважати, що теплоємність газів не залежить від температури і визначається за таблицею. Визначити парціальні тиски газів, що входять у суміш, у кінцевому стані. Зобразити процес на PV – і TS – діаграмах.

Задача 8. Суміш трьох газів перебуває за нормальних фізичних умов. Вихідні дані для розрахунків наведені у таблиці за варіантами. Розрахувати мольний (n_1, n_2, n_3), об'ємний (r_1, r_2, r_3) і масовий (g_1, g_2, g_3) склад суміші, маси (M_1, M_2, M_3) і парціальні об'єми (V_1, V_2, V_3) компонентів суміші, а також масу (M), об'єм (V), газову постійну (R) і молярну масу (μ) суміші.

№ вар	Суміш газів			Вихідні дані		
				$V_1, \text{м}^3$	$M_2, \text{кг}$	$n_3, \text{кмоль}$
1	CO_2	CO	H_2O	314,0	644,0	1,6
2	H_2O	N_2	O_2	300,0	640,0	1,5
3	CO	CH_4	N_2	288,0	628,0	1,4

Задача 9. Газова суміш складається з декількох компонентів, вміст яких у суміші задано у відсотках за об'ємом. Визначити: молекулярну масу суміші; газову постійну суміші; середні мольну, об'ємну і масову теплоємності суміші під постійним тиском у межах температур від t_1 до t_2 .

№ варіанту	Компоненти суміші, % за об'ємом			Температура суміші, °C	
	CO ₂	O ₂	N ₂	t ₁	t ₂
1	18	14	68	300	900
2	22	35	43	500	1000
3	16	41	43	450	800
4	12	14	74	600	1150
5	28	18	54	350	700
6	40	36	24	470	890
7	45	17	38	560	740
8	47	8	45	490	890
9	21	18	61	340	680
10	8	50	42	580	760

Задача 10. Заданий об'ємний склад газової суміші $r_{\text{CH}_4} = 0,25$; $r_{\text{CO}} = 0,5$; $r_{\text{CO}_2} = 0,25$. Визначити масовий і мольний склад суміші, молекулярну масу суміші, газову постійну, питомий об'єм і густину суміші під тиском $P = 0,25$ МПа і за температури суміші $t = 30$ °C. Визначити також масову, об'ємну і мольну теплоємність суміші, при цьому вважати, що теплоємність не залежить від температури, а мольні теплоємності компонентів (кДж/(кмоль·K)) відповідно дорівнюють $(\mu C_p)_{\text{CH}_4} = 37,7$; $(\mu C_p)_{\text{CO}} = 29,3$; $(\mu C_p)_{\text{CO}_2} = 37,7$.

Задача 11. Димові гази відомого складу охолоджуються від температури t_1 до t_2 у процесі під постійним тиском. Потрібно визначити: газову постійну суміші R ; молекулярну масу суміші $\mu_{\text{сум}}$; парціальні тиски складових газів у суміші P_i ; густину суміші $\rho_{\text{сум}}$; наведені об'єми складових газів у суміші V_i ; загальний об'єм суміші $V_{\text{сум}}$; кількість тепла, що виділилося при охолодженні газу (розрахунки виконати з урахуванням залежності теплоємності від температури).

№ вар	Суміш газів, кг					P, бар	t ₁ , °C	t ₂ , °C
	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO			
1	3,94	2,00	18,75	0,85	0,04	1,012	1100	720
2	3,87	1,88	18,55	0,73	0,04	1,012	1080	710
3	3,45	1,75	18,32	0,98	0,03	1,000	1060	720
4	3,14	1,34	18,11	0,65	0,03	1,012	1040	730
5	2,98	1,21	17,65	0,99	0,02	1,012	1020	740

Задача 12. Повітря (вважати, що воно є сумішшю тільки азоту і кисню) має наступний об'ємний склад: $r_{\text{N}_2} = 79,0$ %; $r_{\text{O}_2} = 21,0$ %. Визначити масові

частки азоту і кисню у повітрі, обчислити газову постійну та молекулярну масу повітря.

Задача 13. Повітря об'ємом $0,3 \text{ м}^3$ змішуються з $0,5 \text{ кг}$ вуглекислого газу. Обидва гази до змішування мали наступні параметри: $P = 6 \text{ кг/см}^2$ і $t = 45^\circ\text{C}$. Визначити парціальний тиск вуглекислого газу після змішування.

Задача 14. Димові гази мають наступний масовий склад: $g_{\text{CO}_2} = 16,1 \%$; $g_{\text{O}_2} = 7,5 \%$; $g_{\text{N}_2} = 76,4 \%$. Розрахувати ентальпію $h'_{\text{сум}}$ цих газів, віднесену до 1 м^3 за температури $t = 800^\circ\text{C}$.

Задача 15. Розрахувати дійсну теплоємність C_p суміші пари етилового спирту і пари води. Масова частка етилового спирту рівна $g_{\text{сп}} = 0,9383$. Розрахунки виконати, користуючись таблицями для температур 200 і 300°C .

Задача 16. Визначити питомий об'єм і масову теплоємність C_p пари натрію під тиском $P = 1 \text{ МН/м}^2$ і за температури $t = 927^\circ\text{C}$, якщо відомо, що за цих параметрів пара натрію є сумішшю одноатомних і двоатомних молекул наступного мольного складу: $r_{\text{Na}} = 0,8628$ і $r_{\text{Na}_2} = 0,1372$. Знайти парціальні тиски одно- і двоатомної пари натрію. Обчислити, на скільки б велика була помилка у значенні питомого об'єму, якби пара натрію вважалася одноатомним газом. Теплоємності газів, що складають суміш, розрахувати згідно молекулярно-кінетичної теорії. Атомна вага натрію прийнята рівною $\mu_{\text{Na}} = 23,0$.

Задача 17. У цей час проектують енергетичні установки, що працюють по так званому парогазовому циклу, у якому робочою речовиною є суміш водяної пари і гарячих продуктів згоряння. Масова частка продуктів згоряння палива (прийняти, що продукти згоряння мають властивості повітря) $g = 0,7$. Визначити теплоємність C_p суміші за температури 500 і 800°C , а також питомий об'єм суміші за температури $t = 500^\circ\text{C}$ і під тиском $P = 10 \text{ кг/см}^2$.

Задача 18. У ємності перебуває суміш газів, що утворилась у результаті змішування 10 кг азоту, 13 кг аргону і 27 кг двоокису вуглецю. Визначити мольні частки компонентів суміші, її питомий об'єм за нормальних умов, молекулярну масу суміші і газову постійну, віднесену до одного нормального кубічного метру.

Задача 19. Вологе повітря являє собою суміш сухого повітря і водяної пари. Відомо, що на кожний кілограм сухого повітря у вологому повітрі міститься d , г/кг водяної пари. Визначити масові і об'ємні частки сухого повітря та водяної пари, густину за нормальних умов, газову постійну, віднесену до 1 кг та молекулярну масу суміші, якщо $d = 10 \text{ г/кг}$.

Задача 20. Об'ємний склад горючого газу наступний: $r_{\text{CO}} = 10 \%$, $r_{\text{H}_2} = 45 \%$, $r_{\text{CH}_4} = 35 \%$, $r_{\text{C}_2\text{H}_4} = 4 \%$, $r_{\text{CO}_2} = 3 \%$, $r_{\text{N}_2} = 3 \%$. Визначити молекулярну масу, густину, питомий об'єм суміші за нормальних умов, масову газову постійну $R_{\text{сум}}$, парціальний тиск метану у відсотках і масові частки компонентів.

Задача 21. Суміш газів, що виходить при спалюванні 1 кг мазуту, має наступні складові, задані парціальними об'ємами: $V_{\text{CO}_2} = 1,85 \text{ м}^3$; $V_{\text{O}_2} = 0,77 \text{ м}^3$; $V_{\text{N}_2} = 12,78 \text{ м}^3$. Визначити масові частки і парціальні тиски складових, якщо загальний тиск складає $P = 1,018 \text{ кг/см}^2$.

Задача 22. Ємність розділена перегородкою на дві частини, об'єми яких рівні $V_1 = 1,5 \text{ м}^3$ і $V_2 = 1,0 \text{ м}^3$. У частині V_1 міститься двоокис вуглецю CO_2 під тиском $P_1 = 5 \text{ кг/см}^2$ і за температури $t_1 = 30,0^\circ\text{C}$, а у частині V_2 – кисень O_2 під тиском $P_2 = 2 \text{ кг/см}^2$ і за температури $t_2 = 57,0^\circ\text{C}$. Визначити масові та об'ємні частки CO_2 і O_2 , молекулярну масу суміші і її газову постійну, після того як перегородка буде прибрана і процес змішування закінчиться.

Задача 23. Горюча суміш складається з водню і етану (C_2H_6), що задана об'ємними частками $r_{\text{H}_2} = 0,40$ і $r_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0,40$. Підрахувати кількість повітря, теоретично необхідну для спалювання 1 м^3 суміші (за нормальних умов).

Задача 24. Горючий газ, одержаний при підземній газифікації вугілля, має наступний об'ємний склад: $\text{N}_2 = 63,6 \%$; $\text{H}_2 = 14,5 \%$; $\text{CO} = 10,0 \%$; $\text{CO}_2 = 9,5 \%$; $\text{H}_2\text{S} = 0,6 \%$ і $\text{CH}_4 = 1,8 \%$. Розрахувати об'єм повітря, теоретично необхідний для згоряння 1 м^3 газу (за нормальних умов).

Задача 25. Використовуючи таблиці термодинамічних властивостей газів, обчислити середні питомі (масові) ізобарну та ізохорну теплоємності кисню у діапазоні температур $125^\circ\text{C} - 570^\circ\text{C}$.

Задача 26. Визначити зміну внутрішньої енергії $0,4 \text{ кг}$ азоту за розширення його у циліндрі з рухливим поршнем, якщо у результаті процесу температура азоту знижується від 500°C до 150°C .

Задача 27. Підрахувати середню масову і середню об'ємну теплоємність повітря за нагрівання його від $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 800^\circ\text{C}$ у процесі за постійного об'єму, користуючись таблицями.

Задача 28. Визначити величину ентальпії повітря, відлічену від 0°C до температури $t_1 = 287^\circ\text{C}$ і $t_2 = 560^\circ\text{C}$, якщо відома інтерполяційна формула для дійсної теплоємності повітря:

$$\mu_{\text{ср}} = 6,90 + 14,8 \cdot 10^{-4}t - 20,1 \cdot 10^{-8}t^2 \text{ ккал/(кмоль}^\circ\text{K)}.$$

Задача 29. Визначити значення середньої мольної теплоємності у процесі під постійним тиском для азоту у інтервалі температур від 300 до 400⁰С, якщо вираз для величини його дійсної теплоємності має вигляд:

$$\mu_{cp} = 6,86 + 0,00125 t - 3,01 \cdot 10^{-10} t^2 \text{ ккал/(кмоль}\cdot\text{К)}.$$

Задача 30. У компресорі газової турбіни стискається повітря. Початкова температура повітря $t_1 = 30^{\circ}\text{C}$, кінцева температура після стискання $t_2 = 150^{\circ}\text{C}$. Визначити зміну ентальпії та внутрішньої енергії повітря у процесі стискання.

Задача 31. У регенеративному нагрівачу газової турбіни повітря нагрівається від $t_1 = 130^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = 500^{\circ}\text{C}$. Визначити кількість тепла, підведену до повітря у одиницю часу, якщо витрата його становить 250 кг/ч. Відповідь дати у ккал/год, у кДж/с і кВт.

Задача 32. Підрахувати теплоємність c_v , кДж/(кг·К), для окису азоту NO за температури 1600⁰С, враховуючи енергію коливань атомів у молекулі і вважаючи коливання гармонійними. Порівняти отримані результати з табличними даними.

3. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Термодинамічні потенціали (термодинамічні функції) – характеристичні функції у термодинаміці, зменшення яких у рівноважних процесах, що протікають за постійних значень, які відповідають незалежним параметрам, дорівнює корисній зовнішній роботі.

Виділяють наступні термодинамічні потенціали:

- внутрішня енергія;
- ентальпія;
- вільна енергія Гельмгольца;
- потенціал Гіббса;
- великий термодинамічний потенціал.

Внутрішня енергія – визначається як різниця між кількістю теплоти, повідомленої системі, і роботою, виконаною системою над зовнішніми тілами:

$$U = Q - L. \quad (3.1)$$

Ентальпія визначається у такий спосіб:

$$H = U + PV, \quad (3.2)$$

де P – тиск;

V – об'єм.

Оскільки у ізобарному процесі робота рівна $P\Delta V$, то збільшення ентальпії у ізобарному процесі дорівнює кількості теплоти, яку одержала система.

Вільна енергія Гельмгольца (часто називається вільною енергією) визначається у такий спосіб:

$$F = U - TS, \quad (3.3)$$

де T – температура;

S – ентропія.

Оскільки у ізотермічному процесі кількість теплоти, одержана системою дорівнює $T\Delta S$, то зменшення вільної енергії у ізотермічному процесі дорівнює роботі, що виконана системою над зовнішніми тілами.

Потенціал Гіббса (ще називають енергією Гіббса, термодинамічним потенціалом, вільною енергією Гіббса або вільною енергією) може привести до змінення потенціалу Гіббса з вільною енергією Гельмгольца:

$$G = H - TS = F + PV = U + PV - TS. \quad (3.4)$$

Задана величина термодинамічного потенціалу деякої системи у певній формі еквівалентна заданому рівнянню стану цієї системи.

Відповідні диференціали термодинамічних потенціалів наступні:

– для внутрішньої енергії:

$$dU = TdS - PdV; \quad (3.5)$$

– для ентальпії:

$$dH = TdS + VdP; \quad (3.6)$$

– для вільної енергії Гельмгольца:

$$dF = -PdV - SdT; \quad (3.7)$$

– для потенціалу Гіббса:

$$dG = VdP - SdT. \quad (3.8)$$

Ці вирази математично можна розглядати як повні диференціали функцій двох відповідно незалежних перемінних. Тому розглядають термодинамічні потенціали як функції:

$$U = U(S, V); \quad (3.9)$$

$$H = H(S, P); \quad (3.10)$$

$$F = F(T, V); \quad (3.11)$$

$$G = G(T, P). \quad (3.12)$$

Завдання кожної із цих чотирьох залежностей (3.9–3.12) – тобто конкретизація виду функцій $U(S, V)$, $H(S, P)$, $F(T, V)$, $G(T, P)$ – дозволяє одержати всю інформацію про властивості системи. Так, наприклад, якщо нам задана внутрішня енергія U як функція ентропії S і об'єму V параметри, що залишилися, можуть бути отримані диференціюванням:

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V; \quad (3.13)$$

$$P = - \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S. \quad (3.14)$$

У формулах (3.13 і 3.14) індекси V і S означають сталість другої перемінної, від якої залежить функція. Ці рівності стають очевидними, якщо врахувати, що:

$$dU = TdS - PdV. \quad (3.15)$$

Завдання одного з термодинамічних потенціалів, як функції відповідних змінних являє собою канонічне рівняння стану системи. Як і інші рівняння стану, воно справедливе лише для станів термодинамічної рівноваги. У не рівноважних станах ці залежності можуть не виконуватися.

У стані рівноваги залежність термодинамічних потенціалів від відповідних перемінних визначається канонічним рівнянням стану цієї системи. Однак у станах, відмінних від рівноважного, ці співвідношення втрачають силу. Проте, для не рівноважних станів термодинамічні потенціали також існують.

Таким чином, за фіксованих значень своїх перемінних потенціал може мати різні значення, одне з яких відповідає стану термодинамічної рівноваги.

Можна вказати, що у стані термодинамічної рівноваги відповідне значення потенціалу мінімальне. Тому рівновага є стійкою.

Внутрішня енергія може змінюватися тільки під дією зовнішніх впливів, тобто у результаті повідомлення системі кількості теплоти Q і здійснення над нею роботи $(-L)$:

$$U_2 - U_1 = Q + (-L)$$

$$\text{або} \\ Q = L + \Delta U. \quad (3.16)$$

Вираз (3.16) являє собою закон збереження енергії у застосуванні до макроскопічних систем і є математичним формулюванням першого початку термодинаміки: кількість тепла, повідомлена системі, іде на збільшення внутрішньої енергії системи і на здійснення системою роботи над зовнішніми тілами.

Якщо у ізольованій системі ($Q = L = 0$) не відбувається ніяких перетворень енергії, крім теплообміну між тілами, що входять у цю систему, то кількість теплоти, віддана тілами, що охолоджуються при цьому, дорівнює кількості теплоти, отриманої тілами, які нагріваються. Сумарна внутрішня енергія системи при цьому не змінюється.

$$\Delta U = \sum_{i=1}^N \Delta U_i = 0. \quad (3.17)$$

Вираз (3.17) називається рівнянням теплового балансу, який буде детально розглянутий у розділі 11.

Застосуємо перший початок термодинаміки для одержання виразів для теплоємності ідеального газу. Теплоємність системи чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно повідомити системі, щоб її температура збільшилася на 1 Кельвін.

Якщо система одержала кількість тепла ΔQ , і її температура змінилася на ΔT , то теплоємність цієї системи буде дорівнювати:

$$C = \Delta Q / \Delta T. \quad (3.18)$$

Якщо під системою розуміється 1 моль речовини, то теплоємність називається молярною і позначається C , якщо під системою розуміється одиниця маси речовини, то теплоємність називається питомою і позначається $c_{\text{пит}}$:

$$c_{\text{пит}} = C/M. \quad (3.19)$$

Елементарна кількість теплоти ΔQ , що повідомлена системі, яка представляє собою m/M молей ідеального газу, для зміни її температури від T до $T + \Delta T$, дорівнює:

$$\Delta Q = \frac{m}{M} C \cdot \Delta T. \quad (3.20)$$

Внутрішню енергію можна змінити двома способами: шляхом передачі теплоти і шляхом здійснення роботи. При теплопередачі молекули більш нагрітого тіла передають частину своєї енергії хаотичного руху молекулам більш холодного тіла. Передана кількість теплоти є мірою зміни внутрішньої енергії кожного з тіл: $\Delta U = Q$.

Прийнято вважати, що $Q > 0$, якщо тіло одержує енергію, і $Q < 0$, якщо тіло віддає свою енергію. При здійсненні механічної роботи повинне відбуватися спрямоване переміщення тіл під дією сил, наприклад, переміщення поршня у циліндрі з газом. Якщо газ розширюється, то сила тиску газу на поршень здійснює позитивну роботу ($L > 0$) за рахунок

внутрішньої енергії газу. Якщо зовнішні сили більше сили тиску газу, то газ стискається і робота газу буде негативною ($L < 0$), при цьому внутрішня енергія збільшується.

В обох випадках буде справедливе рівняння $\Delta U = -L$. Якщо система одночасно здійснює роботу і одержує або віддає теплоту, то зміна її внутрішньої енергії дорівнює:

$$\Delta U = Q - L. \quad (3.21)$$

Зміна внутрішньої енергії термодинамічної системи ΔU дорівнює різниці отриманої кількості теплоти Q і роботи L , виконаної системою.

Перший закон термодинаміки є законом збереження енергії для теплових процесів. Згідно з ним $L = Q - \Delta U$.

Цей закон свідчить про те, що будь-яка машина (будь-який двигун) може виконувати роботу тільки за рахунок одержання ззовні деякої кількості теплоти або зменшення своєї внутрішньої енергії. Багато винахідників намагалися побудувати машини, які б виконували роботу, не витрачаючи ніякої енергії. Ці машини називалися вічними двигунами першого роду.

Вічний двигун першого роду не можливий – такий висновок зроблено з першого закону термодинаміки.

3.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Розрахуйте зміну внутрішньої енергії гелію (одноатомний ідеальний газ) за ізобарного розширення від 5 до 10 л під тиском 196 кПа.

Розв'язання.

Початкова і кінцева температури визначаються за формулами:

$$T_1 = P_1 V_1 / nR,$$

$$T_2 = P_2 V_2 / nR.$$

Зміна внутрішньої енергії ідеального газу визначається тільки початковою і кінцевою температурою ($C_V = 3/2 nR$ – ідеальний одноатомний газ):

$$U = C_V (T_2 - T_1) = 3/2 nR (T_2 - T_1) = 3/2 (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \\ = 3/2 \cdot (196 \cdot 10^3) \cdot (10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}) = 1470 \text{ Дж.}$$

Відповідь. Зміна внутрішньої енергії дорівнює 1470 Дж.

Приклад 2. Один моль водяної пари зворотно та ізотермічно сконденсували у рідину за температури 100°C . Розрахуйте роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії та ентальпії у цьому процесі. Питома теплота випаровування води за температури 100°C дорівнює 2260 Дж/г.

Розв'язання.

У процесі $\text{H}_2\text{O}_{(г)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(р)}$ відбулося зворотнє стискання газу під постійним тиском $p = 1 \text{ атм}$ від об'єму:

$$V_1 = nRT / p = 0,082 \cdot 373 = 30,6 \text{ л}$$

до об'єму одного моля рідини (води) $V_2 \sim 0,018 \text{ л}$.

Робота стискання під постійним тиском дорівнює:

$$L = P(V_2 - V_1) \approx -PV_1 = -101,3 \text{ кПа} \cdot 30,6 \text{ л} = -3100 \text{ Дж.}$$

При випаровуванні одного моля води витрачається теплота у кількості:

$$Q = 2260 \text{ Дж/г} \cdot 18 \text{ г} = 40700 \text{ Дж.}$$

Тому при конденсації одного моля води ця теплота, навпаки, виділяється у навколишнє середовище: $Q = -40700 \text{ Дж}$.

Зміна внутрішньої енергії може бути розрахована за першим законом термодинаміки:

$$\Delta U = Q - L = -40700 - (-3100) = -37600 \text{ Дж.}$$

А зміна ентальпії – через зміну внутрішньої енергії:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(pV) = \Delta U + p\Delta V = \Delta U + L = Q = -40700 \text{ Дж.}$$

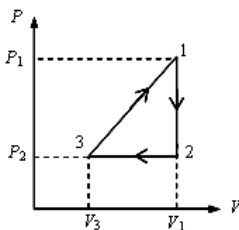
Зміна ентальпії дорівнює теплоті, тому що процес відбувається під постійним тиском.

$$\text{Відповідь. } L = -3100 \text{ Дж, } Q = \Delta H = -40700 \text{ Дж, } \Delta U = -37600 \text{ Дж.}$$

Приклад 3. Газ, що займає об'єм $V_1 = 2 \text{ м}^3$ під тиском $P_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$, здійснює круговий процес, що складається з декількох етапів. Спочатку газ ізохорично охолоджується до температури, за якої його тиск дорівнює $P_2 = 10^5 \text{ Па}$. Потім він ізобарично охолоджується до стану, з якого повертається у початковий стан таким чином, що його тиск змінюється зі зміною об'єму за законом $P = \alpha V$ (α – постійна величина). Накресліть графік даного кругового процесу на PV -діаграмі та знайдіть виконану газом роботу.

Розв'язання.

З умови завдання, стани газу 1 і 3 зображуються точками, що лежать на прямій $P = \alpha V$, яка проходить через початок координат. Процес зображено на рисунку:



Це означає, що:

$$P_1 = \alpha V_1 \text{ і } P_3 = \alpha V_3$$

З урахуванням того, що $P_2 = P_3$, одержуємо наступне рівняння:

$$V_3 = \frac{P_2 V_1}{P_1} = 0,5 \text{ м}^3.$$

Робота при круговому процесі чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком цього процесу, у цьому випадку – площі трикутника 1-2-3:

$$L = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cdot (V_1 - V_3),$$

підставляючи V_3 , одержуємо:

$$L = \frac{(P_1 - P_2)^2 V_1}{2P_1} = 2,25 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Відповідь. Робота у даному круговому процесі дорівнює $2,25 \cdot 10^5$ Дж.

3.2. Питання для самоконтролю

1. Яка енергія називається внутрішньої? Від чого залежить внутрішня енергія?
2. Чи залежить внутрішня енергія ідеального газу від об'єму, який займає газ?
3. Чи залежить внутрішня енергія реального газу від об'єму, який він займає?
4. Яким чином можна визначити внутрішню енергію одноатомного ідеального газу?
5. Якими способами можна змінити внутрішню енергію газу?
6. Яким чином можна розрахувати роботу газу за ізобарного розширення?
7. Як змінюється внутрішня енергія газу при його стисканні або розширенні?
8. Що таке кількість теплоти? Чому вона рівна та у яких одиницях вимірюється?
9. Від чого залежить питома теплоємність речовини?
10. Що називають питомою теплою пароутворення?
11. Як розрахувати кількість теплоти при пароутворенні та конденсації?
12. Що називають питомою теплою плавлення?
13. Як підрахувати кількість теплоти, необхідну для плавлення?

3.3. Тестові питання

1. Математичний вираз першого закону термодинаміки для ізольованих систем має вигляд:

а) $\frac{dQ}{T} = dS$;

б) $dh = dq + v \cdot dP$;

в) $dh = c_p \cdot dT$;

г) $dQ = dU + d\ell$.

2. Рівняння першого закону термодинаміки через ентальпію виражається за формулою:

- а) $\frac{dQ}{T} = dS$;
- б) $dh = dq + v \cdot dP$;
- в) $dh = c_p \cdot dT$;
- г) $dQ = dU + d\ell$.

3. Математичний вираз першого закону термодинаміки, у диференціальній формі для закритих систем, має вигляд:

- а) $Q = U + A$;
- б) $Q = \Delta U + A$;
- в) $dQ = dU + dA$;
- г) $dQ = dU + \delta A$.

4. Який процес відбувся у ідеальному газі, якщо зміна його внутрішньої енергії дорівнює нулю?

- а) ізобарний;
- б) ізотермічний;
- в) ізохорний;
- г) адіабатичний.

5. Під постійним тиском P об'єм газу збільшиться на ΔV . Яка фізична величина дорівнює добутку $P\Delta V$ у цьому випадку?

- а) робота, яку виконує газ;
- б) робота, яку виконують над газом зовнішні сили;
- в) кількість теплоти, отримана газом;
- г) внутрішня енергія газу.

6. Над тілом виконана робота A зовнішніми силами, і тілу передана кількість теплоти Q . Чому рівна зміна внутрішньої енергії ΔU тіла?

- а) $\Delta U = A$;
- б) $\Delta U = Q$;
- в) $\Delta U = A + Q$;
- г) $\Delta U = A - Q$;
- д) $\Delta U = Q - A$.

7. Термодинамічній системі передана кількість теплоти, яка дорівнює 2000 Дж, і над нею виконана робота 500 Дж. Визначити зміну внутрішньої енергії цієї системи.

- а) $\Delta U = 2500$ Дж;
- б) $\Delta U = 1500$ Дж;
- в) $\Delta U = 0$.

3.4. Задачі

Задача 1. Двохатомному газу надано 500 кДж тепла. При цьому газ розширюється під постійним тиском. Знайти роботу розширення газу.

Задача 2. Знайти зміну ентропії при переході 6 г водню об'ємом 20 л під тиском 150 кПа до об'єму 60 л під тиском 100 кПа.

Задача 3. Розплавлений свинець масою 640 г за температури плавлення вилили на лід з температурою $t = 0^{\circ}\text{C}$. Знайти зміну ентропії при цьому процесі.

Задача 4. Ємність, об'ємом $V_1 = 80$ л заповнена киснем під тиском $P_1 = 13$ МПа. Визначити кінцевий тиск кисню і кількість підведеної до нього теплоти, якщо початкова температура кисню складає $t_1 = 15^{\circ}\text{C}$, а кінцева – $t_2 = 30^{\circ}\text{C}$. Теплоємність кисню вважати постійною.

Задача 5. Якою повинна бути площа перетину отвору запобіжного клапана парового котла, щоб при раптовому припиненні відбору з нього сухої насиченої пари у кількості $G = 0,6$ кг/с, абсолютний тиск не перевищив $P = 1,4$ МПа? Атмосферний тиск $B = 750$ мм. рт. ст. Втратою тиску пари, теплообміном при проходженні отвору і швидкістю пари на вході у отвір клапана зневажити.

Задача 6. У процесі розширення ідеальний газ виконує роботу $L = 700$ кДж, а його внутрішня енергія зменшується на $\Delta U = 400$ кДж. Як змінюється ентропія газу у цьому процесі?

Задача 7. Необхідно експериментально визначити залежність збільшення ентропії від об'єму у ізотермічному процесі. Яким чином це можна здійснити, якщо безпосередня зміна ентропії неможлива?

Задача 8. У циліндрі перебуває повітря під тиском $P = 5,1$ атм і за температури $t_1 = 135^{\circ}\text{C}$. Воно займає об'єм $V_1 = 0,88$ м³. Визначити, чому буде рівний об'єм V_2 повітря, якщо при незмінному тиску температура його буде знижена до $t_2 = 0^{\circ}\text{C}$. Визначити кількість відведеного тепла і виконану роботу. Середню теплоємність повітря c_p у заданому інтервалі температур прийняти за таблицями довідкової літератури.

Задача 9. Напишіть вираз для роботи L , виконаної у кожному з основних термодинамічних процесів газів. Як зображується робота на PV -діаграмі?

Задача 10. У калориметрах, міститься 0,5 кг води за температури 30°C , туди опускають зразки металів масою 0,5 кг. Температура кожного зразку дорівнює 150°C . Після того як були опущені зразки срібла, сталі та магнію, температура у відповідних калориметрах стала рівною $37,3^{\circ}\text{C}$, $42,1^{\circ}\text{C}$ і $54,0^{\circ}\text{C}$. Визначити теплоємності металів, зневажаючи масою калориметрів.

Задача 11. Сталевий зразок масою 0,2 кг довгий час знаходиться у нагрівальній печі. Потім він швидко опускається у калориметр, що містить 0,5 кг води за температури $t = 20^{\circ}\text{C}$. Температура води у калориметрі після встановлення рівноважного стану стає рівною 75°C . Яка температура у нагрівальній печі? Теплоємність сталі $c_{\text{ст}} = 470 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

Задача 12. Потужність станції на вихідних шинах становить 12 МВт. Яка кількість палива (B , кг/год) спалюється у топлених котлах електростанції, якщо всі втрати енергії на станції становлять 70 %, а теплота згоряння палива $Q_{\text{н}} = 6700 \text{ ккал/кг}$.

Задача 13. Визначити добову витрату палива на станції потужністю $N = 100000 \text{ кВт}$, якщо її ККД $\eta_{\text{ст}} = 0,35$, а теплота згоряння палива $Q_{\text{н}} = 30000 \text{ кДж/кг}$. Визначити також питому витрату палива b на 1 МДж виробленої енергії.

Задача 14. Скільки кілограмів свинцю можна нагріти від температури 15°C до температури його плавлення 327°C за допомогою удару молота масою 200 кг при падінні його з висоти 2 м, якщо вважати, що вся енергія падіння молота, перетворюється у тепло, яке повністю поглинається свинцем? Теплоємність свинцю $c_{\text{св}} = 0,1200 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Задача 15. При гальмуванні двигуна вода, що охолоджує гальмові колодки, нагрівається на 30°C . Витрата води становить $m_{\text{в}} = 1500 \text{ кг/год}$. Визначити потужність двигуна N , кВт, якщо 25 % тепла тертя розсіюється у навколишнє середовище.

Задача 16. Випробування двигуна ведеться за допомогою приєднаного до нього генератора. Напруга на клеммах генератора постійного струму $U = 220 \text{ В}$, сила струму $I = 50 \text{ А}$, ККД генератора $\eta_{\text{г}} = 0,98$. Визначити потужність двигуна у кВт.

Задача 17. Робота розширення 0,5 кг газу становить $L = 10 \text{ кДж}$. При цьому від газу віднімається 10 ккал тепла. Як зміниться питома (на 1 кг) внутрішня енергія у результаті здійснення процесу.

Задача 18. За температури $t_0 = 0^\circ\text{C}$ і під абсолютним тиском $P_0 = 1 \text{ кг/см}^2$ ентальпія кисню O_2 приймається рівною нулю. Чому рівна у цих умовах внутрішня енергія кисню?

Задача 19. Найважливішою характеристикою роботи двигуна є відношення кількості виробленої енергії до кількості енергії, яку виділяє паливо, споживане двигуном. Це відношення називається коефіцієнтом корисної дії двигуна η . Визначити ККД автомобільного двигуна у 60 л за годинної витрати палива у 7,4 кг/год. Теплоту згоряння палива прийняти рівною 10000 ккал/кг.

Задача 20. На електростанції потужністю $N = 100 \text{ МВт}$ спалюється паливо з теплотою згоряння $Q_n = 30000 \text{ кДж/кг}$. Коефіцієнт корисної дії станції $\eta_{\text{ст}} = 33,0\%$. Визначити годинну витрату палива B .

Задача 21. Парова турбіна витрачає 0,0011 кг пари на одержання 1 кДж електроенергії. На виробництво 1 кг пари необхідних параметрів витрачається 3300 кДж. Знайти ККД паротурбінної установки.

4. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ

З часом у результаті певних впливів параметри стану термодинамічної системи можуть змінюватися. Сукупність безупинно мінливих станів термодинамічної системи називають термодинамічним процесом.

Рівноважним називається такий процес, при якому у будь-який момент часу всі параметри стану системи у будь-якій точці її об'єму однакові. Так, у будь-який момент часу питомий об'єм, тиск і температура у різних частинах об'єму системи відповідно однакові. Не рівноважним називають процес, при якому у цей момент часу параметри стану системи у різних точках її об'єму різні. Таке спостерігається у випадках, коли швидкість руху окремих частин об'єму термодинамічної системи порівнянна зі швидкістю звуку. Процеси, розглянуті у більшості технічних завдань з достатньою точністю можна вважати рівноважними. Це дозволяє зображувати термодинамічні процеси на діаграмах стану – діаграмах, у яких по осях відкладаються параметри стану.

На рис. 4.1 зображений деякий процес 1–2 на PV -діаграмі, тобто діаграмі, на якій по осі абсцис відкладається питомий об'єм, а по осі ординат абсолютний тиск.

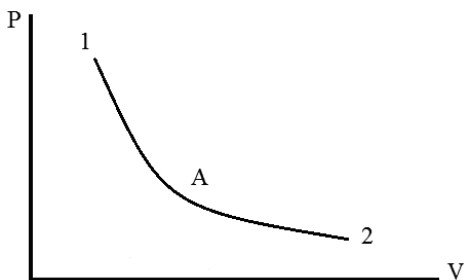


Рисунок 4.1. – Термодинамічний процес на PV -діаграмі

Проміжним станам, через який проходить система у процесі переходу, відповідають точки на кривій А. Якщо система переходить зі стану 1 у стан 2 так, що можливо повернути її у вихідний стан таким чином, щоб у навколишньому середовищі у підсумку не відбулося ніяких змін, то такий процес називається оборотним. Якщо це зробити неможливо, то процес називається необоротним.

Термодинаміка вивчає рівноважні процеси. Вони виступають у ній як моделі процесів, що реально протікають. Заміна реального процесу на ідеальний рівноважний процес у багатьох випадках обґрунтована і дозволяє розв'язати поставлене технічне завдання. Наприклад, процес стиснення газу у циліндрі можна вважати рівноважним, поки швидкість переміщення поршня

у циліндрі набагато менша швидкості звуку, що виконується у більшості технічних завдань.

При дослідженні термодинамічних процесів використовуються рівняння стану ідеальних газів і математичне вираження першого закону термодинаміки.

При вивченні термодинамічних процесів ідеальних газів потрібно:

1) визначити рівняння кривої процесу на PV -діаграмі;

2) встановити зв'язок між термодинамічними параметрами;

3) визначити зміну внутрішньої енергії робочого тіла за формулою, яка справедлива для усіх процесів ідеального газу:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \cdot dT; \quad (4.1)$$

4) визначити величину зовнішньої (термодинамічної) питомої роботи за формулою:

$$\ell = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV; \quad (4.2)$$

5) визначити кількість теплоти, що брала участь у термодинамічному процесі, за формулою:

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_x \cdot dT; \quad (4.3)$$

де c_x – теплоємність процесу;

6) визначити зміну ентальпії у термодинамічному процесі за формулою:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \cdot dT; \quad (4.4)$$

7) визначити зміну ентропії у термодинамічному процесі за формулою, яка справедлива для усіх процесів ідеального газу:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T}. \quad (4.5)$$

У загальному випадку будь-які два термодинамічні параметри з трьох можуть змінюватися довільно. Вивчення роботи теплових машин показує, що найбільший інтерес для практики представляють наступні основні процеси:

– за постійного об'єму ($V = \text{const}$);

– під постійним тиском ($P = \text{const}$);

– за постійної температури ($T = \text{const}$);

– за $dq = 0$ (процес, що протікає без теплообміну робочого тіла з навколишнім середовищем);

– політропний процес, який за певних умов можна розглядати у якості узагальнюючого стосовно усіх основних процесів.

Щоб одержати узагальнені і прості формули, рівняння першого закону термодинаміки розглядаються для 1 кг ідеального газу.

Ізохорний процес ($V = \text{const}$). Такий процес може відбуватися робочим тілом, що перебуває у циліндрі за нерухливого поршню, якщо до робочого тіла підводиться теплота від джерела теплоти (рис. 4.2) або виділяється теплота від робочого тіла до холодильника. За ізохорного процесу виконується умова $dV = 0$ або $V = \text{const}$. У PV -координатах графік процесу являє собою пряму лінію, паралельну осі P . Ізохорний процес може протікати з підвищенням тиску (процес 1–2) і з його зниженням (процес 1–2'). Усі основні рівняння для розрахунків різних параметрів термодинамічних процесів зведено у таблицю 4.1.

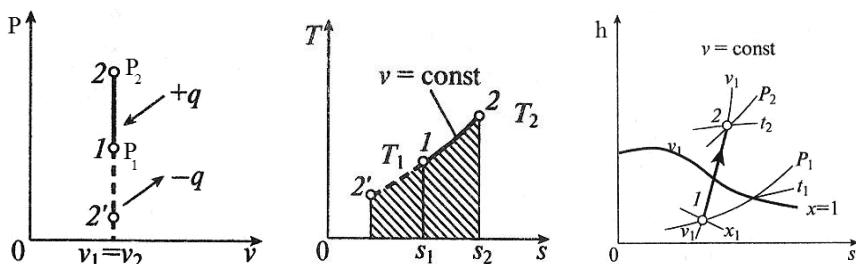


Рисунок 4.2. – Графічні залежності ізохорного процесу

Ізобарний процес ($P = \text{const}$). У PV -координатах графік процесу являє собою пряму лінію паралельну осі v (рис. 4.3). Ізобарний процес може протікати зі збільшенням об'єму (процес 1–2) і зі зменшенням (процес 1–2').

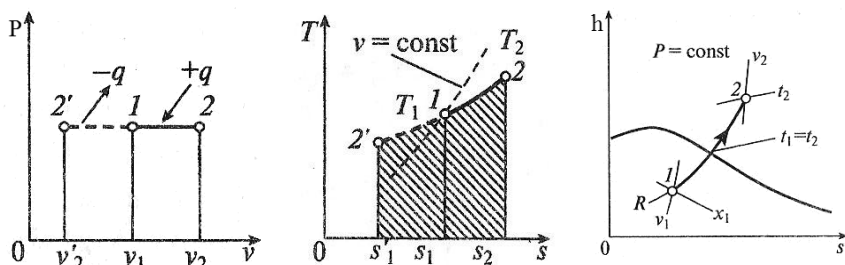


Рисунок 4.3. – Графічні залежності ізобарного процесу

Ізотермічний процес ($T = \text{const}$). У PV -координатах графік процесу зображується рівнобіною гіперболою (рис. 4.4). Ізотермічний процес може протікати як зі збільшенням об'єму (процес 1–2), так і зі зменшенням об'єму (процес 1–2').

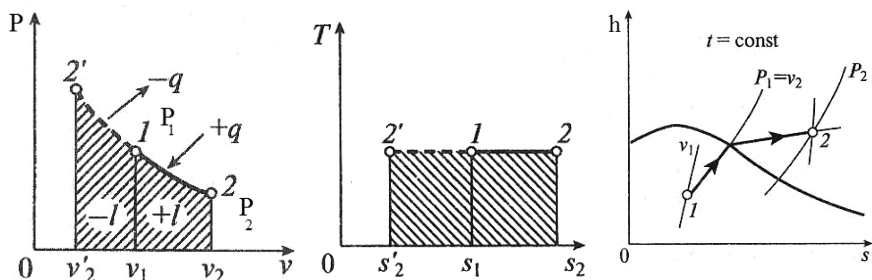


Рисунок 4.4. – Графічні залежності ізотермічного процесу

Адіабатний процес. Адіабатний процес – це процес, при якому робоче тіло не обмінюється теплотою з навколишнім середовищем ($dq = 0$). У PV -координатах адіабатний процес зображується не рівнобокою гіперболою $vk \cdot P = \text{const}$ (рис. 4.5). Так як $k > 1$, то адіабата проходить крутіше гіперболи. Адіабатний процес може протікати як зі збільшенням об'єму (процес 1–2), так і зі зменшенням об'єму (процес 1–2').

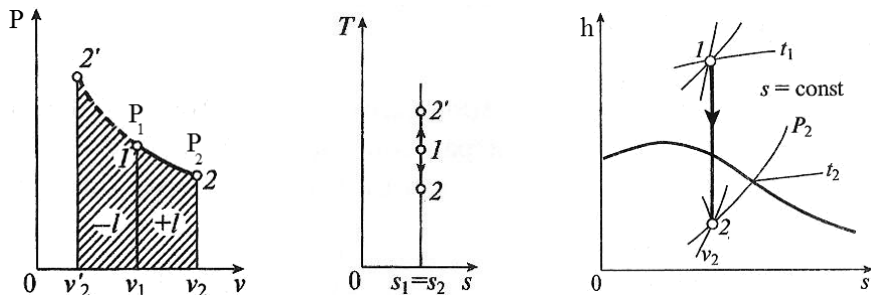


Рисунок 4.5. – Графічні залежності адіабатного процесу

Ентропія газу у адіабатному процесі не змінюється, тому що $dq = 0$. Тому у TS -координатах адіабатний процес зображується прямою лінією, паралельною осі температур.

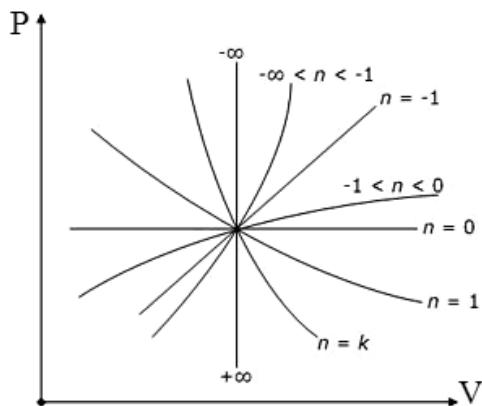
Політропний процес. Політропним називається процес, який описується рівнянням: $PV^n = \text{const}$. Показник політропи n може приймати будь-які значення у межах від $-\infty$ до $+\infty$, але для даного процесу він є постійною величиною.

Графічна залежність політропа у PV -координатах залежно від показника політропа n наведена на рис 4.6.

У таблиці 4.1. зведені усі основні рівняння для розрахунків даних різних процесів: рівняння зв'язку між параметрами роботи, зміни внутрішньої енергії, зміни ентальпії, теплоємності, зміни ентропії та теплоти.

Таблиця 4.1. – Рівняння розрахунків параметрів основних термодинамічних процесів

Проц.	Значення n	Рівнян. проц.	Зв'язок між параметрами	Робота l	Δu	Δi	c_n	Δs	q
Політропний	$(+\infty \div -\infty)$	$P_0^n = \text{const}$	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$\frac{(P_2 v_2 - P_1 v_1)}{R(T_2 - T_1)}$ $\frac{n-1}{n-1} \left[\frac{P_2 v_1}{n-1} 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	$c_v \frac{n-k}{n-1}$	$c_v \frac{n-k}{n-1} \cdot \frac{T_2}{T_1}$	$c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)$
Ізобарний	0	$p = \text{const}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{P(v_2 - v_1)}{R(T_2 - T_1)}$	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	c_p	$c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_p(T_2 - T_1)$
Ізотермний	∞	$V = \text{const}$	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$	0	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	c_v	$c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$c_v(T_2 - T_1)$
Ізотермичний	1	$T = \text{const}$ $PV = \text{const}$	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_2}{v_1}$	$\frac{P_1 v_1 \ln \frac{P_1}{P_2}}{RT \ln \frac{v_2}{v_1}}$	0	0	∞	$\frac{q}{T} = R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$	$q = \ell$
Адіабатний	$k = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{R}{c_v}$	$PV^k = \text{const}$	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$\frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{R(T_2 - T_1)}$ $\frac{k-1}{k-1}$	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	0	0	0



$PV^0 = \text{const}$ ($n = 0$) – ізобара;
 $PV = \text{const}$ ($n = 1$) – ізотерма;
 $P^0V = \text{const}$, $PV^\infty = \text{const}$ – ізохора;
 $PV^k = \text{const}$ ($n = k$) – адіабата;
 $n > 0$ – гіперболічні криві,
 $n < 0$ – параболи.

Рисунок 4.6. – Графічна залежність політропного процесу

4.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Аміак об'ємом 2 м^3 під тиском $1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ адіабатно стискається і тиск підвищується до $4,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Визначити об'єм аміаку після стискання.

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо показник адіабати для аміаку:

$k = 1,333$.

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння зв'язку між параметрами для адіабатного процесу:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k.$$

Виразуємо з нього кінцевий об'єм і здійснюємо розрахунок:

$$V_2 = \frac{V_1}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}} = \frac{2}{\left(\frac{4,8 \cdot 10^5}{1,2 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1}{1,333}}} = 0,707 \text{ м}^3.$$

Відповідь. Кінцевий об'єм аміаку дорівнює $0,707 \text{ м}^3$.

Приклад 2. За адіабатного стискання метану, що перебуває під тиском $2 \cdot 10^5$ Па і за температури 200°C , тиск підвищився до $6 \cdot 10^5$ Па. Визначити кінцеву температуру газу.

Розв'язання.

За таблицями додатку приводимо параметри у систему СІ:

$T = 473 \text{ К}$.

За таблицями додатку знаходимо показник адіабати для метану:

$k = 1,333$.

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння зв'язку між параметрами для адіабатного процесу:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Виражаємо з нього кінцеву температуру і здійснюємо розрахунок:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 473 \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5} \right)^{\frac{0,333}{1,333}} = 622,375 \text{ К}.$$

Відповідь. Кінцева температура метану дорівнює $622,375 \text{ К}$.

Приклад 3. Визначити роботу адіабатного стискання 5 кг кисню, якщо відомо, що при цьому температура підвищиться на 350°C .

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо показник адіабати і питому газову постійну для кисню:

$k = 1,41$;

$R_{\text{O}_2} = 259,8 \text{ Дж/кг}^\circ\text{град}$.

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння для розрахунків питомої роботи для адіабатного процесу і проводимо розрахунок:

$$\ell = \frac{R \Delta T}{k-1} = \frac{259,8 \cdot 350}{1,41 - 1} = 221780,488 \text{ Дж} \approx 221,781 \text{ кДж}.$$

Визначаємо повну роботу:

$$L = m \cdot \ell = 5 \cdot 221,781 = 1108,905 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Робота адіабатного стискання кисню дорівнює $1108,905 \text{ кДж}$.

Приклад 4. Визначити зміну внутрішньої енергії за адіабатного процесу розширення 3 кг азоту, якщо відомо, що при цьому температура зменшується на 100°C .

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо показник адіабати і питому газову постійну для азоту:

$k = 1,4$;

$R_{\text{O}_2} = 259,8 \text{ Дж/кг}^\circ\text{град}$.

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння для розрахунків питомої зміни внутрішньої енергії для адіабатного процесу і проводимо розрахунки:

$$\Delta u = -\frac{R\Delta T}{k-1} = -\frac{259,8 \cdot 100}{1,4-1} = -6495 \text{ Дж.}$$

Визначаємо зміну внутрішньої енергії:

$$\Delta U = m \cdot \Delta u = 3 \cdot (-64,95) = -194,85 \text{ кДж.}$$

Відповідь. Зміна внутрішньої енергії дорівнює 194,85 кДж.

Приклад 5. Визначити роботу ізотермічного розширення 7 кг вуглекислого газу, якщо відомо, що при цьому об'єм збільшується у 3 рази. Температура газу складає 300 К.

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо питому газову постійну для вуглекислого газу:

$$R_{\text{CO}_2} = 188,9 \text{ Дж/кг·град.}$$

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння для розрахунків питомої роботи для ізотермічного процесу і проводимо розрахунки:

$$\ell = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = 188,9 \cdot 300 \cdot \ln 3 = 62258,358 \text{ Дж} \approx 62,258 \text{ кДж.}$$

Визначаємо повну роботу:

$$L = m \cdot \ell = 7 \cdot 62,258 = 435,806 \text{ кДж.}$$

Відповідь. Робота ізотермічного розширення дорівнює 435,806 кДж.

Приклад 6. Визначити кількість теплоти, що виділяється у процесі ізотермічного стисання 4 кг повітря, якщо відомо, що при цьому підвищується тиск у 9 разів. Процес відбувається за температури 350 К.

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо питому газову постійну для повітря:

$$R_{\text{пов}} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння для розрахунків питомої кількості теплоти для ізотермічного процесу:

$$q = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = 287 \cdot 350 \cdot \ln 9 = 220711,209 \text{ Дж} \approx 220,711 \text{ кДж.}$$

Визначаємо повну роботу:

$$L = m \cdot \ell = 4 \cdot 220,711 = 882,844 \text{ кДж.}$$

Відповідь. Кількість теплоти дорівнює 882,844 кДж.

Приклад 7. У процесі ізотермічного стисання об'єм газу зменшується з 10 м^3 до 2 м^3 . Початковий тиск дорівнює $1 \cdot 10^5$ Па. Визначити тиск після стисання газу.

Розв'язання.

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння зв'язку між параметрами для ізотермічного процесу:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Виразуємо з нього кінцевий тиск і здійснюємо розрахунок:

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = 1 \cdot 10^5 \frac{10}{2} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Відповідь. Тиск після стискання газу дорівнює $5 \cdot 10^5$ Па.

Приклад 8. Газ під тиском $4 \cdot 10^5$ Па розширяється за політропою до двократного об'єму і тиску $2,5 \cdot 10^5$ Па. Визначити показник політропи.

Розв'язання.

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння зв'язку між параметрами для політропного процесу:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n.$$

Виразуємо з нього показник політропи і здійснюємо розрахунок:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{\lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{\lg\left(\frac{4 \cdot 10^5}{2,5 \cdot 10^5}\right)}{\lg(2)} = 0,677.$$

Відповідь. Показник політропи дорівнює 0,677.

Приклад 9. Визначити зміну ентропії при політропному розширенні 1 кг кисню, якщо відомо, що його температура зменшується у 2 рази. Теплоємність прийняти постійною. Показник політропи дорівнює 1,5.

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо значення масової ізохорної теплоємності та показник адіабати для кисню:

$$k = 1,398;$$

$$c_v = 0,6548 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К.}$$

З таблиці 4.1. вибираємо відповідне рівняння для розрахунку зміни ентропії для політропного процесу:

$$\Delta s = c_v \frac{n - k}{n - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,6548 \frac{1,5 - 1,398}{1,5 - 1} \ln 2 = 0,0925 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Відповідь. Зміна ентропії дорівнює $0,0925 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}$.

Приклад 10. Робота витрачена на політропне стискання 2 кг повітря становить 300 кДж. Початкова температура газу 17°C . Показник політропи становить 1,2. Визначити кінцеву температуру.

Розв'язання.

За таблицями додатку приводимо параметри у систему СИ:

$$T = 290 \text{ К.}$$

За таблицями додатку знаходимо значення питомої газової постійної повітря:

$$R_{\text{пов}} = 287 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град.}$$

З таблиці 4.1 вибираємо рівняння роботи для політропного процесу:

$$L = m \cdot \ell = \frac{mR(T_2 - T_1)}{n - 1}.$$

З цього рівняння виражаємо і визначаємо кінцеву температуру:

$$T_2 = \frac{L(n-1)}{mR} + T_1 = \frac{300 \cdot 10^3(1,2 - 1)}{2 \cdot 287} + 290 = 394,56 \text{ К.}$$

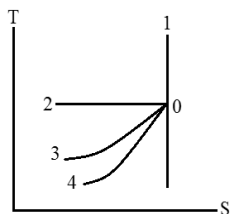
Відповідь. Кінцева температура дорівнює 394,56 К.

4.2. Питання для самоконтролю

1. Термодинамічний процес, поняття.
2. Поняття оборотного процесу.
3. У чому полягає взаємодія оборотного процесу закритої термодинамічної системи з навколишнім середовищем?
4. Графік довільного термодинамічного процесу у PV–координатах.
5. Графік довільного термодинамічного процесу у TS–координатах.
6. Поняття необоротного процесу.
7. Фундаментальні процеси термодинаміки.
8. Пояснення фізичної суті фундаментальних процесів.
9. Рівняння ізохорного ($V = \text{const}$), ізобарного ($P = \text{const}$), ізотермічного ($T = \text{const}$), адіабатного ($dq = 0$) і політропного процесів та їх зображення на PV– і TS–діаграмах.
10. Як змінюється температура газу при ізобарному і адіабатному розширенні? Відповідь проілюструйте графіками процесів на PV– і TS–діаграмах.
11. Яке значення має показник політропи у ізобарному, ізохорному і у ізотермічному процесах?
12. Який процес називається політропним?
13. Лінія якого процесу, адіабатного або ізотермічного, іде крутіше у координатах P–V?
14. У яких межах змінюється теплоємність політропного процесу?
15. Що таке рівноважний стан газу?
16. Чому рівна частка тепла, що витрачається на зміну внутрішньої енергії у різних термодинамічних процесах.

4.3. Тестові питання

1. Яка з показаних на TS–діаграмі ліній процесів стиснення зображує термодинамічний процес з показником політропи $n = k$?



- а) лінія 0–1;
- б) лінія 0–2;
- в) лінія 0–3;
- г) лінія 0–4.

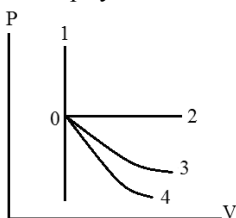
2. У якому термодинамічному процесі внутрішня енергія не змінюється?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

3. Чому рівна частина тепла, що іде на зміну внутрішньої енергії у ізохорному процесі?

- а) $\alpha = 0$;
- б) $\alpha = 1$;
- в) $\alpha = k$.

4. Яка з показаних на PV–діаграмі ліній процесів розширення газу зображує ізотерму?

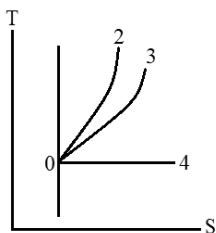


- а) лінія 0–2;
- б) лінія 0–3;
- в) лінія 0–4.

5. У якому термодинамічному процесі стискання газу температура зменшується?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

6. Яка з показаних на TS–діаграмі ліній процесів розширення зображує ізохору?

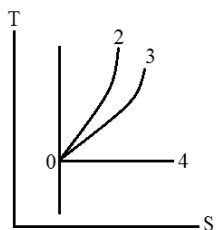


- а) лінія 0–2;
- б) лінія 0–3;
- в) лінія 0–4.

7. У якому термодинамічному процесі розширення газу температура збільшується?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

8. Яка з показаних на TS–діаграмі ліній процесів розширення зображує ізобару?

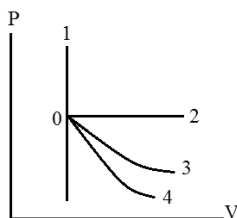


- а) лінія 0–1;
- б) лінія 0–2;
- в) лінія 0–3;
- г) лінія 0–4.

9. У якому термодинамічному процесі усе підведене тепло витрачається на зміну внутрішньої енергії?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

10. Як на PV–діаграмі розташовується політропний процес розширення газу з показником $0 < n < 1$?

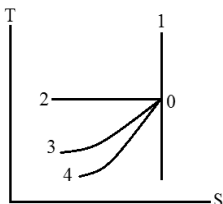


- а) 1–0–2;
- б) 2–0–3;
- в) 3–0–4;
- г) 2–0–4.

11. У якому термодинамічному процесі розширення робота відбувається тільки за рахунок зміни внутрішньої енергії?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

12. Яка з показаних на TS-діаграмі ліній процесів стисання газу зображує ізобарний процес?



- а) лінія 0–1;
- б) лінія 0–2;
- в) лінія 0–3;
- г) лінія 0–4.

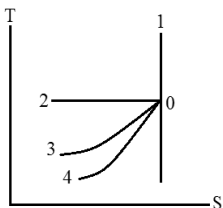
13. У якому термодинамічному процесі усе підведене тепло витрачається на роботу?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

14. Яка частина підведеного тепла у ізотермічному процесі розширення витрачається на роботу?

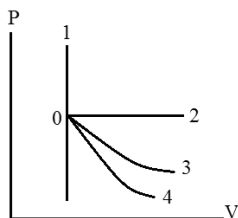
- а) 0;
- б) 1,4;
- в) 1,8;
- г) 1.

15. Яка з показаних на TS-діаграмі ліній процесів стисання газу зображує процес із показником $n = 1$?



- а) лінія 0–1;
- б) лінія 0–2;
- в) лінія 0–3;
- г) лінія 0–4.

16. Між якими лініями процесів на PV-діаграмі розташовується політропа процесу розширення газу з показником $1 < n < k$?



- а) 1–0–2;
- б) 2–0–3;
- в) 3–0–4;
- г) 2–0–4.

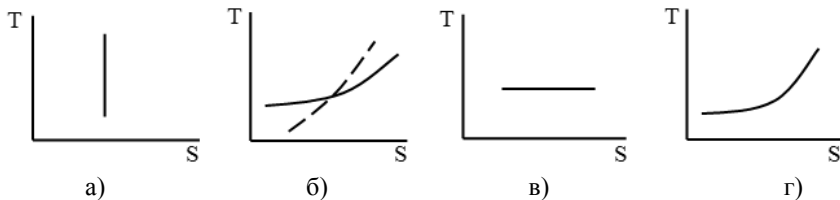
17. Чому рівна частка тепла α , що витрачається на зміну внутрішньої енергії у ізотермічному процесі?

- а) $\alpha = 0$;
- б) $\alpha = 0,5$;
- в) $\alpha = 0,7$;
- г) $\alpha = 1$.

18. У якому термодинамічному процесі розширення відсутній теплообмін між робочим тілом і навколишнім середовищем?

- а) у адіабатному;
- б) у ізохорному;
- в) у ізотермічному;
- г) у ізобарному.

19. Зображення ізохорного процесу на діаграмі у координатах T – S має вигляд:



20. Зв'язок між параметрами для ізохорного процесу має вигляд:

- а) $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$;
- б) $\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$;
- в) $P_1 v_1 = P_2 v_2$;
- г) $\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \frac{T_2}{T_1}$.

21. Рівняння для розрахунків роботи розширення газу у ізохорному процесі має вигляд:

а) $L = 0$;

б) $L = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)$;

в) $L = m \cdot P_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$;

г) $L = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2)$.

22. Зміна ентальпії газу у ізохорному процесі представлена рівнянням:

а) $\Delta h = 0$;

б) $\Delta h = c_v \cdot (T_2 - T_1)$;

в) $\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_2)$;

г) $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

23. Рівняння для зміни ентропії у ізохорному процесі має вигляд:

а) $\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$;

б) $\Delta S = 0$;

в) $\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$;

г) $\Delta S = m \cdot c_p \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}$.

24. Рівняння для розрахунків теплоти у ізохорному процесі має вигляд:

а) $Q = m \cdot c_v \cdot \Delta t$;

б) $Q = m \cdot (c_v + R) \cdot \Delta t$;

в) $Q = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$;

г) $Q = m \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}$.

25. Рівняння для розрахунків підведеної теплоти у ізобарному процесі має вигляд:

а) $Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

б) $Q = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2)$;

в) $Q = m \cdot P_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$;

г) $Q = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$.

26. Зв'язок між параметрами ізобарного процесу представлений виразом:

а) $\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$;

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

в) $P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$;

г) $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

27. Рівняння для зміни внутрішньої енергії газу у ізобарному процесі має вигляд:

а) $\Delta U = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)$;

б) $\Delta U = l$;

в) $\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$;

г) $\Delta U = 0$.

28. Рівняння для зміни ентальпії газу у ізобарному процесі має вигляд:

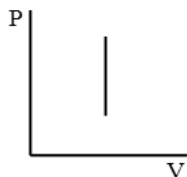
а) $\Delta h = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2)$;

б) $\Delta h = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

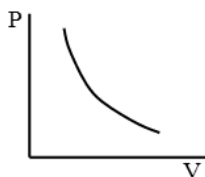
в) $\Delta h = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

г) $\Delta h = 0$.

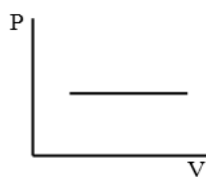
29. Ізотермічний процес у газі у координатах P–V показаний на діаграмі:



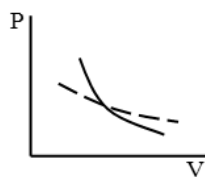
а)



б)



в)



г)

30. Зв'язок між параметрами ізотермічного процесу представлений виразом:

а) $\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$;

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

в) $P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$;

г) $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

31. Рівняння роботи для ізотермічного процесу має вигляд:

а) $\ell = P \cdot (v_2 - v_1)$;

б) $\ell = 0$;

в) $\ell = q$;

г) $\ell = \frac{1}{k-1} \cdot (P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2)$.

32. Рівняння для розрахунків зміни внутрішньої енергії газу у ізотермічному процесі має вигляд:

а) $\Delta U = Q$;

б) $\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$;

в) $\Delta U = U_2 - U_1$;

г) $\Delta U = 0$.

33. Рівняння для розрахунків зміни ентальпії газу у ізотермічному процесі представлене виразом:

а) $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

б) $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

в) $\Delta h = h^* - h'$;

г) $\Delta h = 0$.

34. Рівняння адіабатного процесу у газі представлене виразом:

а) $P \cdot v^k = \text{const}$;

б) $P \cdot v^n = \text{const}$;

в) $P \cdot v = R \cdot T$;

г) $P \cdot v = \text{const}$.

35. Показник адіабати k визначається за формулою:

а) $k = \frac{c_p}{c_v}$;

б) $k = \frac{c_v}{c_p}$;

в) $k = \frac{c_v}{c_p}$;

г) $k = \frac{c_p}{c_v}$.

36. Значення показника адіабати залежить від:

а) температури;

б) тиску;

- в) числа атомів газу;
- г) питомого об'єму.

37. Рівняння для розрахунків підведеної до газу теплоти у адіабатному процесі має вигляд:

- а) $q = \Delta U + l$;
- б) $q = \Delta U$;
- в) $q = 0$;
- г) $q = c_v \cdot (T_2 - T_1)$.

38. Відведена теплота від газу у адіабатному процесі визначається за формулою:

- а) $q = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;
- б) $q = \Delta U$;
- в) $q = 0$;
- г) $q = c_p \cdot (T_1 - T_2)$.

39. Рівняння для розрахунків зміни ентальпії газу у адіабатному процесі має вигляд:

- а) $\Delta h = 0$;
- б) $\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_2)$;
- в) $\Delta h = h'' \cdot (1 - x) + h' \cdot x$;
- г) $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$.

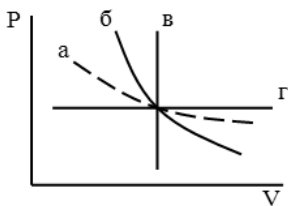
40. Рівняння для розрахунків зміни ентропії у адіабатному процесі має вигляд:

- а) $\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$;
- б) $\Delta S = 0$;
- в) $\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$;
- г) $\Delta S = m \cdot c_p \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$.

41. Рівняння для зміни внутрішньої енергії газу у адіабатному процесі має вигляд:

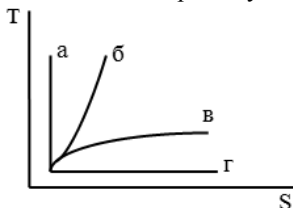
- а) $\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2)$;
- б) $\Delta U = 0$;
- в) $\Delta U = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$;
- г) $\Delta U = Q - \ell$.

42. Адіабатний процес у газі у координатах P–V показаний на діаграмі:



- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г.

43. Адіабатний процес у газі у координатах Т–S показаний на діаграмі:



- а) а;
- б) б;
- в) в;
- г) г.

44. Рівняння політропного процесу виглядає як:

- а) $P \cdot v^k = \text{const}$;
- б) $P \cdot v = R \cdot T$;
- в) $P \cdot v^n = \text{const}$;
- г) $P \cdot v = \text{const}$.

45. Рівняння для розрахунків показника політропи має вигляд:

- а) $n = \frac{P \cdot V}{\mu \cdot R \cdot T}$;
- б) $k = \frac{1}{\alpha}$;
- в) $n = \frac{c_{\Pi} - c_p}{c_{\Pi} - c_v}$;
- г) $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot C$.

46. Рівняння для розрахунків зміни внутрішньої енергії у політропному процесі має вигляд:

- а) $\Delta U = 0$;
- б) $\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$;
- в) $\Delta U = l$;
- г) $\Delta U = Q_1$.

47. Рівняння для розрахунків зміни ентальпії газу у політропному процесі має вигляд:

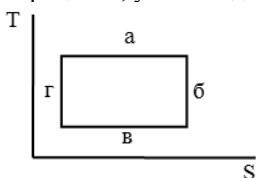
- а) $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;

- б) $\Delta h = 0$;
 в) $\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_2)$;
 г) $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$.

48. Рівняння для розрахунків ентропії газу у політропному процесі має вигляд:

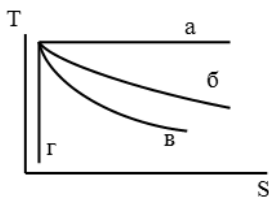
- а) $\Delta S = 0$;
 б) $\Delta S = m \cdot c_n \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$;
 в) $\Delta S = m \cdot c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$;
 г) $\Delta S = m \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$.

49. Процесам, у яких підводиться теплота, відповідає лінія:



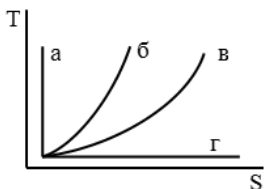
- а) а;
 б) б;
 в) б, г;
 г) г.

50. Процес розширення газу, у якому відбувається найбільша робота, показаний на діаграмі кривою:



- а) а;
 б) б;
 в) в;
 г) г.

51. Процес, що має мінімальний теплообмін представлений на діаграмі кривою:



- а) а;
 б) б;
 в) в;
 г) г.

4.4. Задачі

Задача 1. Повітря під початковим тиском 0,35 МПа і за температури 36⁰С ізотермічно стискається до зменшення об'єму у 3 рази. Визначити температуру і тиск газу наприкінці стискування.

Задача 2. На скільки зменшиться теоретична потужність на привод триступінчастого компресора (у порівнянні з одноступінчастим), продуктивністю $V = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$, якщо початкові параметри повітря $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 17^0\text{C}$, кінцевий тиск $P_2 = 6,4 \text{ МПа}$, показник політропи стискування $n = 1,3$, ККД компресора $\eta_k = 0,8$?

Задача 3. Водень масою 6 кг розширяється політропно з показником політропи 1,1 від початкового стану з параметрами 1,6 МПа і 100⁰С до кінцевого тиску 16 МПа. Визначити теплоту Q , роботу L , зміну внутрішньої енергії ΔU , ентальпію ΔH і ентропію ΔS . Вважати, що $c = \text{const}$.

Задача 4. У балоні перебуває повітря під тиском $P_1 = 3,0 \text{ МПа}$ і за температури $t_1 = 27^0\text{C}$. Повітря з балона швидко випускають, і, коли тиск у балоні зрівняється з атмосферним, клапан балона закривають. Вважаючи процес випускання повітря адіабатним, визначити тиск у балоні після відновлення у ньому колишньої температури.

Задача 5. Визначити теоретичну потужність, затрачену на привод одноступінчастого компресора продуктивністю $V = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, якщо початкові параметри повітря $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 20^0\text{C}$, ступінь підвищення тиску $\beta = 6$, показник політропи стискування $n = 1,3$, ККД компресора $\eta_k = 0,78$.

Задача 6. Повітря з початковим станом (1) ($P_1 = 4 \text{ МПа}$ і $t_1 = 1600^0\text{C}$) ізохорно охолоджується до температури $t_2 = 200^0\text{C}$, а потім ізотермічно стискається до стану (3), у якому $P_3 = P_1$. Показати процес 1–2–3 на PV – і TS –діаграмах. Визначити значення t , P і V повітря у точках 1, 2, 3. Обчислити питомі значення роботи, теплоти, зміни внутрішньої енергії та ентропії повітря у процесах 1–2, 2–3 і 1–2–3 у цілому. Ізохорний процес розрахувати з урахуванням залежності теплоємності повітря від температури.

Задача 7. Повітря з початковим об'ємом $V_1 = 80 \text{ м}^3$, початковим тиском $P_1 = 2 \text{ атм.}$ і початковою температурою $t_1 = 15^0\text{C}$, стискається до зменшення об'єму у 5 разів. Стискування проводиться за ізотермою, за адіабатою та політропою з показником $n = 1,5$. Визначити масу стисненого повітря і кінцеві його параметри (тиск, температуру, питомий об'єм і ентропію).

Задача 8. Фактична потужність, затрачена на привод одноступінчастого компресора, становить 52 кВт. Визначити адіабатний ККД цього компресора,

якщо у ньому адіабатно стискається 0,3 кг/с повітря, при цьому тиск змінюється від $P_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 20^\circ\text{C}$) до $P_2 = 0,45$ МПа. Зобразити процес у координатах P – V , і T – S .

Задача 9. Суміш, що містить $M_1 = 0,9$ кіломолей вуглекислого газу і $M_2 = 0,1$ кіломолей окису вуглецю з початковими параметрами $P_1 = 6$ МПа і $T_1 = 2000$ К, розширюється до кінцевого об'єму $V_2 = \varepsilon V_1$ ($\varepsilon = 14$). Розширення здійснюється за ізотермою та адіабатою. Визначити газову постійну суміші, її масу і початковий об'єм, кінцеві параметри суміші, роботу розширення, теплоту процесу, зміну внутрішньої енергії, ентальпію і ентропію. Надати зведену таблицю результатів і її аналіз. Показати процеси на PV – і TS –діаграмах. Показник адіабати, а отже, і теплоємності c_p і c_v слід прийняти не залежними від температури.

Задача 10. Витрата газу у поршневому одноступінчастому компресорі становить $V_1 = 60$ м³/хв, під тиском $P_1 = 0,1$ МПа і за температури $t_1 = 25^\circ\text{C}$. Під стиском температура газу підвищується до $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Стискання відбувається за політропою з показником $n = 1,28$. Визначити кінцевий тиск, роботу стискання і роботу привода компресора, кількість відведеного тепла (у кіловатах), а також теоретичну потужність привода компресора. Робоче тіло – CO_2 .

Задача 11. Повітря з початковою температурою $t_1 = 27^\circ\text{C}$ стискається у одноступінчастому поршневому компресорі від тиску $P_1 = 0,1$ МПа до тиску $P_2 = 0,85$ МПа. Стискання може відбуватися за ізотермою, за адіабатою і за політропою з показником політропи $n = 1,24$. Визначити для кожного з трьох процесів стискання кінцеву температуру газу t_2 , відведену від газу теплоту Q (кВт) і теоретичну потужність компресора, якщо його продуктивність скалатає $G = 0,5 \cdot 10^3$ кг/ч. Розрахунки провести без врахування залежності теплоємності від температури.

Задача 12. Кисень у кількості $M = 5$ кг у результаті ізобарного або ізохорного підведення теплоти збільшує свою температуру від $t_1 = 30^\circ\text{C}$ до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Визначити роботу розширення, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та ентальпії, вважаючи залежність теплоємності від температури: нелінійною і лінійною.

Задача 13. Окис вуглецю масою 3,75 кг ізобарно розширяється до об'єму $V_2 = 0,3$ м³/кг, потім у ізотермічному процесі об'єм зростає у 3 рази. При цьому робота, здійснена робочим теплом, у 2 рази перевищує роботу ізобарного процесу. Зміна внутрішньої енергії у цих процесах $\Delta U = 840$ кДж. Визначити початкові параметри, підведене тепло і роботу. Теплоємність прийняти постійною. Процеси представити на PV – і TS –діаграмах.

Задача 14. Азот масою 3,83 кг з параметрами $P_1 = 5,87$ бар і $V_1 = 0,2$ м³/кг у процесі політропного розширення здійснює роботу у 490 кДж. Внутрішня енергія при цьому зменшується на 209 кДж. Визначити кінцеві параметри газу і тепло, що бере участь у процесі. Скласти схему трансформації енергії. Представити процес на PV – і TS – діаграмах.

Задача 15. Відцентровий компресор подає $M = 200$ кг/хв повітря (тиск $P_2 = 3,8$ бар і температура $t_2 = 165^{\circ}\text{C}$), початковий стан повітря визначається параметрами: тиск $P_1 = 1,1$ бар і температура $t_1 = 17^{\circ}\text{C}$. Охолодження відсутнє. Визначити показник політропи і потужність привода компресора.

Задача 16. Балон місткістю $V = 20$ л заповнений азотом за температури $T = 400$ К. Коли частину газу витратили, тиск у балоні знизився на $\Delta P = 200$ кПа. Визначити масу витраченого газу. Процес вважати ізотермічним.

Задача 17. Азот масою 100 г за температури 200 К має об'єм 1,2 м³, а за температури 500 К має тиск 2 атм. Перехід від першого стану до другого здійснюється у два етапи: спочатку за адіабатою, потім за ізохорою. Знайти зміну внутрішньої енергії, виконану роботу і поглинене тепло. Виконайте аналогічні розрахунки за зворотного процесу охолодження, що переводить систему з першого стану у другий. Порівняйте результати.

Задача 18. Робоче тіло – 1 кг сухого повітря. Граничні температури робочого тіла у циклі: найбільша $t_1 = 300^{\circ}\text{C}$, найменша $t_3 = 18^{\circ}\text{C}$. Граничні тиски робочого тіла у циклі: найбільший $P_1 = 2,8$ МПа, найменший $P_3 = 0,1$ МПа. Визначити: основні параметри стану робочого тіла у характерних точках циклу; кількість тепла, підведеного у циклі; кількість тепла, відведеного у циклі; корисну роботу, виконану робочим тілом за цикл; термічний ККД циклу; зміни ентропії у ізотермічних процесах циклу. Побудувати цикл (у масштабі) у координатах P – V і T – S .

Задача 19. Компресор всмоктує $V = 87$ м³/год повітря під тиском $P_1 = 1,2 \cdot 10^5$ Па і за температури $t_1 = 26^{\circ}\text{C}$. Кінцевий тиск повітря складає $P_2 = 9 \cdot 10^5$ Па. Визначити теоретичну потужність двигуна для привода компресора і витрату охолодженої води, якщо її температура підвищується на $\Delta t = 16^{\circ}\text{C}$. Розрахунки виконувати для ізотермічного, адіабатного і політропного стиснення. Показник політропи прийняти $n = 1,2$. Теплоємність води прийняти $c_p = 4,19$ кДж/кг.

Задача 20. Повітря під тиском $P_1 = 1,2 \cdot 10^5$ Па і за температури $t_1 = 26^{\circ}\text{C}$ повинно бути стиснуте за адіабатою до тиску $P_2 = 9 \cdot 10^5$ Па. Визначити температуру наприкінці стиснення, теоретичну роботу компресора і величину об'ємного ККД для: одноступінчастого компресора;

двоступінчастого компресора із проміжним холодильником, у якому повітря охолоджується до початкової температури.

Задача 21. Газ (повітря) у кількості $M = 5$ кг у результаті ізобарного підведення теплоти ($p = \text{const}$) збільшує температуру від $t_1 = 40^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1200^\circ\text{C}$. Визначити роботу розширення, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та ентальпії, вважаючи залежність теплоємності від температури: нелінійною і лінійною.

Задача 22. Азот від стану (1) ($P_1 = 0,1$ МПа і $t_1 = 100^\circ\text{C}$) у ізобарному процесі розширяється до стану (2), у якому $t_2 = 900^\circ\text{C}$, а потім ізотермічно переходить у стан (3), у якому $V_3 = V_1$. Показати процес 1–2–3 на PV - і TS -діаграмах. Визначити значення P , t і V азоту у точках 1, 2 і 3. Обчислити питомі роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії та ентропії азоту у процесах 1–2, 2–3 і 1–2–3. Ізобарний процес розрахувати з урахуванням залежності теплоємності азоту від температури.

Задача 23. У політропному процесі ідеальний газ виконує роботу $L = 200$ кДж/кг, а його внутрішня енергія зменшується на $\Delta U = 300$ кДж/кг. Як змінюється ентропія газу у цьому процесі? Чи можна, не знаючи, який це газ, обчислити показник політропи?

Задача 24. Азот масою $m = 7,5$ кг розширюється від початкового стану $P_1 = 12$ бар, $t_1 = 200^\circ\text{C}$ до кінцевого тиску $P_2 = 2$ бар. Показник адіабати азоту $k = 1,4$. Визначити кінцеві параметри і роботу газу при розширенні: ізотермічному; ізоентропному і політропному ($n = 1,2$).

Задача 25. У закритій ємності, що має об'єм $V = 0,8$ м³, перебуває вуглекислий газ під тиском $P_1 = 22$ кг/см² і за температури $t_1 = 20^\circ\text{C}$. До газу підводиться $Q_v = 1100$ ккал тепла. Визначити температуру і тиск вуглекислого газу наприкінці процесу. Завдання розв'язати двома способами: вважаючи теплоємність постійною і приймаючи її за молекулярно-кінетичною теорією; вважаючи теплоємність залежною від температури.

Задача 26. У газгольдері об'ємом $V = 15$ м³ перебуває метан CH_4 під тиском $P_1 = 8 \cdot 10^5$ Н/м² і за температури $t_1 = 10^\circ\text{C}$. Завдяки сонячній радіації температура газу протягом дня підвищилася на $\Delta t = 15^\circ\text{C}$. Як зріс тиск газу у газгольдері і яка кількість тепла була поглинена газом? Теплоємність метану вважати не залежною від температури. Молекула метану нелінійна.

Задача 27. Повітря у кількості 5 м³/хв за температури $t = 20^\circ\text{C}$ і під тиском $P = 1$ кг/см² надходить у компресор, де стискається, потім проходить по трубкам холодильника, що охолоджує водою. Визначити годинну витрату холодної води, якщо на виході з компресору повітря має параметри: $P_1 = 8$

кг/см² і $t_1 = 180^{\circ}\text{C}$. Температура повітря за холодильником $t_2 = 35^{\circ}\text{C}$. Вода нагрівається на $\Delta t = 18^{\circ}\text{C}$. Втратами тепла знехтувати.

Задача 28. Через повітряпідігрівач котлового агрегату протікає повітря у кількості $V_0 = 11000 \text{ м}^3/\text{год}$ (за нормальних умов). На вході його температура складає $t_1 = 45^{\circ}\text{C}$. Яка температура t_2 повітря на виході з повітряпідігрівача, якщо топкові гази подають йому кількість тепла, рівну $Q_p = 670 \text{ Мкал/год}$? Визначити величину роботи розширення повітря, яку він здійснює протягом 1 години. Процес підігріву повітря вважати ізобаричним $P_{\text{пов}} = 1 \text{ кг/см}^2$.

5. ВОДЯНА ПАРА

Відомо, що будь-яка речовина залежно від зовнішніх умов (тиску і температури) може перебувати у газоподібному, рідкому і твердому агрегатних станах, або фазах, а також одночасно перебувати у двох або трьох станах.

Перехід речовини з одного агрегатного стану у інший називається фазовим переходом, або фазовим перетворенням. Речовина у різних агрегатних станах має різні властивості, зокрема густину. Ця відмінність пояснюється характером міжмолекулярної взаємодії.

Перехід речовини із твердого стану у рідкий називається плавленням, з рідкого у газоподібний – випаровуванням, з твердого у газоподібний – сублімацією. Зворотні процеси відповідно називаються твердінням, або кристалізацією, конденсацією і десублімацією.

Процес одержання пари з рідини може здійснюватися випаровуванням і кипінням. Випаровуванням називається пароутворення, що відбувається тільки з вільної поверхні рідини і за будь-якої температури.

Кипінням називається бурхливе пароутворення по всій масі рідини, яке відбувається при підведенні до рідини через стінку ємності певної кількості теплоти. При цьому утворені на стінках ємності і усередині рідини пухирці пари, збільшуючись у об'ємі, піднімаються на поверхню рідини.

Процес пароутворення починається за досягнення рідиною температури кипіння, яка називається температурою насичення t_n і протягом усього процесу залишається незмінною. Температура кипіння, або температура насичення t_n , залежить від природи речовини і тиску, причому з підвищенням тиску t_n збільшується. Тиск, що відповідає t_n називається тиском насичення P_n .

Насиченою парою називають пару, яка утворилася у процесі кипіння і перебуває у динамічній рівновазі з рідиною. Насичена пара по своєму стану буває сухою насиченою і вологою насиченою.

Суха насичена пара являє собою пару, що не містить краплин рідини і має температуру насичення ($t = t_n$) під даним тиском.

Волога насичена пара – це рівноважна суміш, що містить краплі рідини, яка перебуває за температури кипіння, і сухої насиченої пари.

Відношення маси сухої насиченої пари $m_{c.п.}$ до маси вологої насиченої пари $m_{в.п.}$ називається ступенем сухості вологої пари і визначається за формулою:

$$x = \frac{m_{c.п.}}{m_{в.п.}}. \quad (5.1)$$

Таким чином, для рідини $x = 0$, а для сухої насиченої пари $x = 1$.

Якщо до сухої насиченої пари продовжувати підводити теплоту, то її температура збільшиться. Пара, температура якої під даним тиском більше, ніж температура насичення ($t > t_n$), називається перегрітою. Іншими словами,

перегріта пара – це пара, що перебуває за температури, що перевищує температуру кипіння рідини і під тиском, який рівний тиску перегрітої пари. Величина перевищення температури парою температури кипіння рідини називається ступенем перегріву пари.

Водяна пара є реальним робочим тілом і може перебувати у трьох станах: вологого насичення, сухого насичення і у перегрітому стані. Для технічних потреб водянну пару одержують у парових котлах (парогенераторах), де спеціально підтримується постійний тиск.

За початкову температуру води під будь-яким тиском, приймають температуру $t = 0^{\circ}\text{C}$. Таким чином, лінія I на рис. 5.1 відповідає станам так званої холодної рідини під різними тисками, що має температуру 0°C (ізотерма холодної рідини). Питомий об'єм води за температури $t = 0^{\circ}\text{C}$ приймається рівним $0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$. Внаслідок незначного стискання води, лінія I виявляється майже вертикальною прямою. Зліва від цієї прямої перебуває область рівноважного співіснування води і льоду.

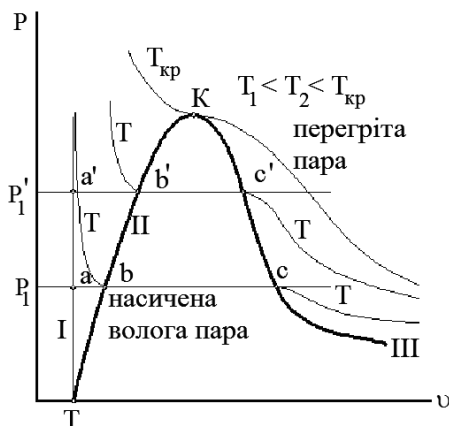


Рисунок 5.1. – Графічна залежність процесу пароутворення у Pv -координатах

За початок відліку u , h та s для води прийнято вважати потрійну точку T ($P_0 = 611 \text{ Па}$, $t_0 = 0,01^{\circ}\text{C}$, $v_0 = 0,00100 \text{ м}^3/\text{кг}$).

Зневажаючи впливом тиску на зміну об'єму води, вважають для всіх станів на лінії I $v_0 = 0,00100 \text{ м}^3/\text{кг}$, $u_0 = 0$, $i_0 = 0$ і $s_0 = 0$.

Кінцевий стан води на стадії підігріву (точка b) визначається досягненням під заданим тиском температури кипіння, яка залежить від тиску. З Pv -діаграми випливає, що зі збільшенням тиску температура кипіння збільшується. Ця залежність встановлюється дослідним шляхом.

Стану киплячої води під різними тисками буде відповідати лінія II, яка називається нижньою прикордонною кривою. Вона зображує залежність питомих об'ємів киплячої води від тиску.

На нижній прикордонній кривій ступінь сухості $x = 0$.

Параметри киплячої води наводяться у таблицях у залежності їх від тиску або температури.

Подальше підведення теплоти до киплячої води, яке здійснюється у випарному контурі парогенератора, супроводжується бурхливим пароутворенням усередині рідини і переходом частини води у пару. Таким чином, ділянці б–с буде відповідати рівноважний стан суміші рідини і пари (волога насичена пара). У кожній точці цього процесу вода буде характеризуватися масовою часткою сухої насиченої пари, що міститься у ній (ступенем сухості – x).

Кінцевий стан на цій стадії характеризується повним перетворенням рідини у пару, яка буде мати температуру, рівну температурі насичення ($t_c = t_n$) під заданим тиском. Така пара, як уже згадувалося раніше, зветься сухою насиченою парою.

Процес пароутворення б–с є одночасно ізобарним ($P = P_1 = \text{const}$) і ізотермічним ($T = T_1 = \text{const}$). При цьому затрачувана теплота витрачається не на підвищення температури, а тільки на подолання сил притягання між молекулами і на роботу розширення пари.

Враховуючи, що між температурою насичення t_n і тиском P існує однозначний зв'язок, стан сухої насиченої пари буде визначатися тільки одним параметром – тиском або температурою.

Стану сухої насиченої пари під різними тисками буде відповідати лінія ІІІ, яка називається верхньою прикордонною кривою. Очевидно, що на верхній прикордонній кривій у кожній точці ступінь сухості $x = 1$.

Слід звернути увагу на те, що у процесі пароутворення питомий об'єм води різко збільшується. Так, для води під тиском $P = 0,1$ МПа питомий об'єм киплячої води дорівнює $v = 0,001043$ м³/кг, тоді як питомий об'єм сухої насиченої пари рівний 1,696 м³/кг. Зі збільшенням тиску ця різниця зменшується і у критичній точці К питомі об'єми води і пари дорівнюють 0,00326 м³/кг. При цьому $t_{кр} = 374,15^{\circ}\text{C}$, а $P_{кр} = 221,29$ бар. При тисках і температурах більших критичних процес пароутворення відсутній. Спостерігається перехід води у пару при перетинанні ізобари $T_{кр}$.

Для ідеальних газів залежність між параметрами P , v і T встановлюється рівнянням стану:

$$P \cdot v = R \cdot T. \quad (5.2)$$

Причому два із цих параметрів однозначно визначають третій. Перегріта і насичена пара за своїми властивостями суттєво відрізняються від ідеальних газів. Тому співвідношення між параметрами p , v і T перегрітої і насиченої пари значно складніше, ніж рівняння стану ідеального газу.

Для насиченої пари тиск є функцією температури ($P = f(T)$). Таким чином, для насиченої пари дві змінні P і T не визначають стану. Причому питомий об'єм v_x визначається ступенем сухості пари x . Питомий об'єм v_x є функцією параметрів P і x або T і x . Об'єми v_b і v_c є функціями температури

або тиску (рис. 5.1). Отже, щоб визначити стан насиченої пари, необхідно встановити залежності виду: $P = f(T)$, $v_b = j(P)$, $v_c = f(P)$.

Відомі численні рівняння стану перегрітої водяної пари. Ці рівняння пов'язують між собою основні параметри P , v та T .

Одним з найбільш точних рівнянь стану водяної пари є рівняння Вукаловича–Новикова, у якому враховується явище силової взаємодії молекул:

$$P \cdot V = R \cdot T \left(1 - A \frac{1}{v} - B \frac{1}{v} \right) \quad (5.3)$$

де A і B – коефіцієнти, які визначають за формулами:

$$A = \frac{a}{RT} - b + \frac{cR}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}} \quad (5.4)$$

$$B = \frac{bcR}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}} - 4 \cdot \left(1 - \frac{k}{T^{\frac{3m_2-4m_1}{2}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{8b}{v} - \frac{r}{v^3} \right) \cdot \left(\frac{cR}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}} \right)^2 \quad (5.5)$$

де a і b – постійні величини для реальних газів у рівняннях стану;

R – універсальна газова постійна;

g , c , k , m_1 , m_2 – коефіцієнти, які виражають ступінь асоціації.

Однак такі рівняння мають досить складний вид і розрахунки за ними є надзвичайно трудомісткими. Тому на практиці для розрахунків параметрів пари використовуються спеціальні таблиці і діаграми, складені на підставі експериментальних і теоретичних даних. У них наводяться відповідні один одному значення P , T , v_b , v_c , h_b , h_c , g , s_b і s_c .

У наш час складені докладні таблиці для перегрітої та насиченої водяної пари. Таблиці складені з високим ступенем точності. Відомі три види таблиць:

- 1) термодинамічні властивості води і водяної пари у стані насичення (за температурою) (наведена у додатках);
- 2) термодинамічні властивості води і водяної пари у стані насичення (під тиском) (наведена у додатках);
- 3) термодинамічні властивості води і перегрітої пари (наведена у додатках).

У першій таблиці вказують температури сухої насиченої пари і киплячої води (за Цельсієм) і відповідні їм тиски, ентальпії, ентропії, теплоти пароутворення і питомі об'єми. У другій таблиці вказують тиск сухої насиченої пари і киплячої води та відповідні їм температури, ентальпії, ентропії, теплоти пароутворення і питомі об'єми. У третій таблиці для різних комбінацій температур і тисків наводяться відповідні їм ентальпії, ентропії і питомий об'єм води або перегрітої пари.

Для практичних розрахунків процесів водяної пари широко застосовують h - s -діаграму, на якій теплота і ентальпія вимірюються лінійними відрізками.

У системі координат h - s (рис. 5.2) спочатку будуються нижня (а-К) і верхня (К-с) прикордонні криві за табличним даними h та s . Нижня прикордонна крива проходить через початок координат, тому що при $t = 0^\circ\text{C}$ ентропія і ентальпія прийняті рівними нулю.

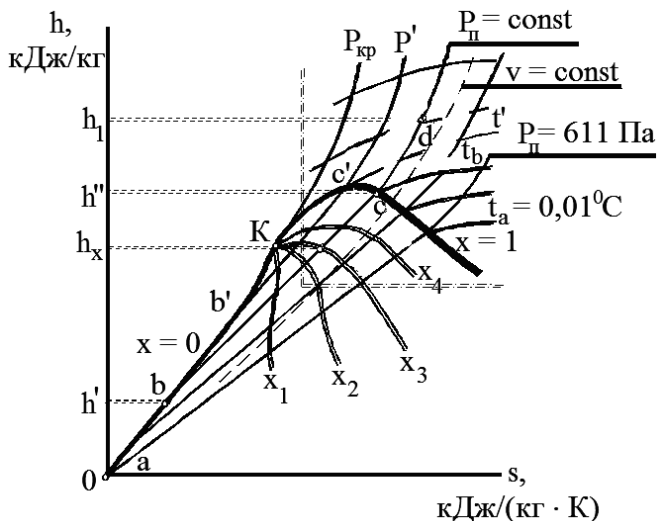


Рисунок 5.2. – h - s -діаграма водяної пари

Потім наносять ізобари, які у області насиченої пари, будучи одночасно і ізотермами, є прямими лініями. На h - s -діаграмі кутовий коефіцієнт ізобари рівний T . Тому чим вище тиск насичення, тем вище температура T і тим більше тангенс кута нахилу ізобари.

У області перегрітої пари ізобари та ізотерми розходяться, причому ізобари піднімаються догори у вигляді логарифмічних кривих, а ізотерми прагнуть до горизонталі. Це пояснюється тим, що зі зниженням тиску перегріта пара за властивостями наближається до ідеального газу, ентальпія якого залежить тільки від температури, тобто лінії $t = \text{const}$ одночасно є лініями $h = \text{const}$. Чим вище температура, тем вище розташована ізотерма.

У області вологої пари нанесені лінії однакового ступеня сухості $x = \text{const}$. На цю ж діаграму часто наносять ізохори, які проходять крутіше ізобар.

h - s -діаграма має ряд важливих властивостей: по ній можна швидко визначити параметри пари і різницю ентальпій у вигляді відрізків, наочно зобразити адіабатний процес, що має велике значення при вивченні роботи парових двигунів, і вирішувати інші завдання. Звичайно для практичного

використання у великому масштабі будують так звану робочу частину діаграми (на рис. 5.2 вона обмежена штрих-пунктиром).

Як ми вже відзначали, пара як реальний газ не підкоряється простим закономірностям ідеальних газів, тому розрахунки процесів з водяною парою проводяться за допомогою таблиць або графічно за допомогою діаграм.

Найбільше зручно оцінювати характер зміни параметрів різних процесів за h -діаграмою. Основні термодинамічні процеси водяної пари ($v = \text{const}$, $P = \text{const}$, $t = \text{const}$) представлені на h -діаграмі відповідними кривими.

Адіабатний процес ($s = \text{const}$) зображується прямою, паралельною осі ординат. Слід звернути особливу увагу на різні закономірності зміни параметрів стану пари у термодинамічних процесах залежно від стану пари (насичена або перегріта). Так, у ізотермічному процесі у області насиченої пари ентальпія змінюється значно, а у області перегрітої пари, особливо далі від лінії $x = 1$, процес $t = \text{const}$ наближається до $h = \text{const}$. Це свідчить про те, що властивості перегрітої пари у цих областях наближаються до властивостей ідеального газу.

5.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Яку кількість теплоти необхідно повідомити 3 кг водяної пари зі ступенем вологості 0,9, щоб перевести її під постійним тиском 0,1 бар у суху насичену пару?

Розв'язання.

Користуючись h -діаграмою на перетинанні ліній тиску 0,1 бар і ступеня сухості 0,9 знаходимо точку початку процесу, і визначаємо значення ентальпії у цій точці:

$$h_1 = 2340 \text{ кДж/кг.}$$

На перетині ліній тиску 0,1 бар і ступеня сухості 1 знаходимо точку закінчення процесу, і визначаємо значення ентальпії у цій точці:

$$h_2 = 3590 \text{ кДж/кг.}$$

Розрахуємо питому кількість теплоти:

$$q = h_2 - h_1 = 3590 - 2340 = 1250 \text{ кДж/кг.}$$

Розрахуємо кількість теплоти:

$$Q = m \cdot q = 3 \cdot 1250 = 3750 \text{ кДж.}$$

Відповідь. Кількість теплоти дорівнює 3750 кДж.

Приклад 2. Водяна пара масою 2 кг нагрівається під постійним тиском 3 бари від 200 до 450°C. Визначити витрачену кількість тепла.

Розв'язання.

Користуючись h -діаграмою на перетинанні ліній тиску 3 бари і температури 300 °C знаходимо точку початку процесу, і визначаємо значення ентальпії у цій точці:

$$h_1 = 3085 \text{ кДж/кг.}$$

На перетині ліній тиску 3 бари і температури 450 °С знаходимо точку закінчення процесу, і визначаємо значення ентальпії у цій точці:

$$h_2 = 3390 \text{ кДж/кг.}$$

Розраховуємо питому кількість теплоти:

$$q = h_2 - h_1 = 3390 - 3085 = 305 \text{ кДж/кг.}$$

Розраховуємо кількість теплоти:

$$Q = m \cdot q = 2 \cdot 305 = 610 \text{ кДж.}$$

Відповідь. Кількість теплоти дорівнює 610 кДж.

Приклад 3. Визначити кількість теплоти, затрачену на ізобарне нагрівання 4 кг сухої насиченої пари до наступних параметрів: 10 бар і 300°С.

Розв'язання.

Користуючись h_s -діаграмою на перетинанні ліній тиску 10 бар і ступені сухості 1 знаходимо точку початку процесу, і визначаємо значення ентальпії у цій точці:

$$h_1 = 2785 \text{ кДж/кг.}$$

На перетині ліній тиску 10 бар і температури 300 °С знаходимо точку закінчення процесу, і визначаємо значення ентальпії у цій точці:

$$h_2 = 3085 \text{ кДж/кг.}$$

Розраховуємо питому кількість теплоти:

$$q = h_2 - h_1 = 3085 - 2785 = 300 \text{ кДж/кг.}$$

Розраховуємо кількість теплоти:

$$Q = m \cdot q = 4 \cdot 265 = 1060 \text{ кДж.}$$

Відповідь. Кількість теплоти дорівнює 1060 кДж.

Приклад 4. Визначити ентальпію 1 кг вологої насиченої пари під тиском 5 бар і ступені сухості 0,8, користуючись таблицями водяної пари.

Розв'язання.

За таблицями додатку для тиску 5 бар визначаємо ентальпію киплячої води і приховану теплоту пароутворення:

$$h' = 640,1 \text{ кДж/кг;}$$

$$r = 2109 \text{ кДж/кг.}$$

Визначаємо ентальпію:

$$h_x = h' + r \cdot x = 640,1 + 2109 \cdot 0,8 = 2327,3 \text{ кДж/кг.}$$

Відповідь. Ентальпія дорівнює 2327,3 кДж/кг.

Приклад 5. Визначити внутрішню енергію 1 кг пари, що перебуває під тиском 6 бар і за температури 200°С.

Розв'язання.

Користуючись h_s -діаграмою на перетині ліній тиску 6 бар і температури 200°С знаходимо точку стану, і за нею визначаємо значення ентальпії та питомий об'єм. Або за таблицями додатку знаходимо значення ентальпії та питомого об'єму, відповідних заданим параметрам пари:

$$h_1 = 2849 \text{ кДж/кг.}$$

$$v = 0,352 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо питому внутрішню енергію:

$$u = h'' - p \cdot v'' = 2849 - 600 \cdot 0,352 = 2637,8 \text{ кДж/кг}.$$

Знаходимо повну внутрішню енергію:

$$U = m \cdot u = 1 \cdot 2637,8 = 2637,8 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Повна внутрішня енергія дорівнює 2637,8 кДж.

Приклад 6. На скільки градусів потрібно додатково нагріти воду, що знаходиться під тиском 15 бар і за температури 170°C , щоб почалося кипіння.

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо значення температури кипіння для заданого тиску:

$$t_k = 198,28^\circ\text{C}.$$

Визначаємо різницю температур:

$$\Delta t = t_k - t = 198,28 - 170 = 28,28^\circ\text{C}.$$

Відповідь. Воду необхідно нагріти додатково на $28,28^\circ\text{C}$.

Приклад 7. Визначити внутрішню енергію 3 кг сухої насиченої пари за температури 110°C .

Розв'язання.

За таблицями додатку знаходимо значення ентальпії, тиску і питомого об'єму для сухої насиченої пари при заданій температурі:

$$h'' = 2689,98 \text{ кДж/кг};$$

$$P = 0,14325 \text{ МПа} = 143,25 \text{ кПа};$$

$$v'' = 1,21 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо питому внутрішню енергію:

$$u = h'' - P \cdot v'' = 2689,98 - 143,25 \cdot 1,21 = 2516,65 \text{ кДж/кг}.$$

Знаходимо повну внутрішню енергію:

$$U = m \cdot u = 3 \cdot 2516,65 = 7549,94 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Внутрішня енергія дорівнює 7549,94 кДж.

Приклад 8. Водяна пара масою 4 кг під тиском 2 бари і за температури 150°C ізобарно нагріваються до 400°C . Визначити роботу розширення.

Розв'язання.

Користуючись h_s -діаграмою на перетині ліній тиску 2 бари і температури 150°C знаходимо точку стану, і за нею визначаємо значення питомого об'єму:

$$v_1 = 0,98 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Користуючись h_s -діаграмою на перетині ліній тиску 2 бари і температури 400°C знаходимо точку стану, і за нею визначаємо значення питомого об'єму:

$$v_2 = 1,59 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

За таблицею додатку приводимо тиск у систему СИ:

$$P = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Визначаємо питому роботу розширення:

$$l = p(v_2 - v_1) = 2 \cdot 10^5 (1,59 - 0,98) = 122000 \text{ Дж/кг} = 122 \text{ кДж/кг}.$$

Знаходимо повну роботу розширення:

$$L = m l = 4 \cdot 122 = 488 \text{ кДж}.$$

Відповідь. Робота розширення дорівнює 488 кДж.

5.2. Питання для самоконтролю

1. Опишіть процес пароутворення на P - v і h - s -діаграмах.
2. Яка пара називається вологою і сухою насиченою, яка – перегрітою?
3. Чим відрізняються фазові P - T -діаграми для нормальних і аномальних речовин?
4. Що таке фундаментальна (головна) потрійна точка речовини?
5. Чим відрізняються процеси випаровування і кипіння?
6. Як розраховують питомий об'єм, ентропію і ентальпію вологої насиченої пари?
7. Зобразіть прикордонні лінії на фазовій h - s -діаграмі.
8. Покажіть, що у області перегрітої пари ізобара на h - s -діаграмі іде крутіше ізохори.
9. Назвіть величини критичного тиску і критичної температури для води.
10. Що називається ступенем сухості пари?
11. Що називається теплотою рідини?
12. Що називається скритою теплотою пароутворення?

5.3. Тестові питання

1. Суміш рідини і водяної пари називається:
 - а) сухою насиченою парою;
 - б) перегрітою парою;
 - в) вологою ненасиченою парою;
 - г) вологою насиченою парою.
2. Масова частка водяної пари у суміші характеризується:
 - а) ентальпією;
 - б) питомим об'ємом пари у суміші;
 - в) паровмістом;
 - г) вологовмістом.
3. Рівняння Руша показує залежність між:
 - а) температурою і питомим об'ємом водяної пари;
 - б) температурою і паровмістом водяної пари;
 - в) тиском і питомою теплотою пароутворення;

г) температурою кипіння і тиском у системі.

4. Паровміст у області вологої насиченої пари дорівнює:

- а) $x = 0$;
- б) $0 < x < 1$;
- в) $x = 1$;
- г) $x > 1$.

5. У момент повного випаровування рідини пара називається:

- а) вологою ненасиченою парою;
- б) сухою насиченою парою;
- в) перегрітою парою;
- г) сухою насиченою парою.

6. Паровміст у області сухої насиченої пари дорівнює:

- а) $x = 0$;
- б) $0 < x < 1$;
- в) $x = 1$;
- г) $x > 1$.

7. При нагріванні сухої насиченої пари вона перетворюється у:

- а) вологу насичену пару;
- б) суху насичену пару;
- в) рідину;
- г) перегріту пару.

8. Паровміст перегрітої пари дорівнює:

- а) $x = 1$;
- б) $x > 1$;
- в) $x < 1$;
- г) $x = 0$.

9. Термодинамічні параметри води і водяної пари у області сухої насиченої пари позначаються:

- а) P', v', h', S', U' ;
- б) P_0, v_0, h_0, S_0, U_0 ;
- в) P_x, v_x, h_x, S_x, U_x ;
- г) P'', v'', h'', S'', U'' .

10. Питому теплоту паротворення знаходять з виразу:

- а) $r = h'' + h'$;
- б) $r = h'' - h'$;
- в) $r = 2h'' - h'$;
- г) $r = h' - h''$.

11. Теплота, витрачена на нагрівання води до кипіння визначається за формулою:

- а) $q_1 = q_1' + q_1''$;
- б) $q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1)$;
- в) $q_0 = c_p \cdot (t_k - t_0)$;
- г) $q_{ne} = h_{ne} - h''$.

12. Теплота, витрачена на перегрівання пари, визначається за формулою:

- а) $q_0 = c_p \cdot (t_k - t_0)$;
- б) $q_{ne} = h_{ne} - h''$;
- в) $q = \Delta U + l$;
- г) $q_1 = c_v \cdot (T_4 - T_1)$.

13. Питомий об'єм вологої насиченої пари знаходять з виразу:

- а) $v_1 = \frac{p_2 \cdot v_2}{p_1}$;
- б) $v_x = v' \cdot (1 - x) + v'' \cdot x$;
- в) $v_x = x \cdot v''$;
- г) $v = \frac{R \cdot T}{p}$.

14. Ентальпію вологої насиченої пари визначають за формулою:

- а) $h_x = h' \cdot (1 - x) + h'' \cdot x$;
- б) $h = U + p \cdot v$;
- в) $h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$;
- г) $\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_2)$.

15. Ентропію вологої насиченої пари визначають за формулою:

- а) $\Delta S = \frac{dU}{T} + R \cdot \frac{dv}{v}$;
- б) $S_x = S' \cdot (1 - x) + S'' \cdot x$;
- в) $\Delta S = S_2 - S_1$;
- г) $\Delta S = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$.

5.4. Задачі

Задача 1. Водяна пара масою 1 кг від початкового стану, що характеризується тиском $P_1 = 1$ МПа і температурою $t_1 = 420^\circ\text{C}$, ізобарно стискається до стану, що характеризується ступенем сухості рівним $x_2 = 0,85$. Визначити кількість відведеної теплоти q , роботу стискання L , і зміну внутрішньої енергії ΔU . Розв'язати задачу з використанням таблиць.

Задача 2. Водяна пара об'ємом $V = 2,5$ м³ ізобарно розширяється від початкового стану, що характеризується тиском $P_1 = 1$ МПа і ступенем сухості $x_1 = 0,8$ до кінцевого стану, що характеризується температурою $t_2 = 250^\circ\text{C}$. Визначити кількість підведеної теплоти Q , роботу розширення L , і зміну внутрішньої енергії ΔU . Розв'язати задачу з використанням таблиць.

Задача 3. Водяна пара масою 1 кг адіабатно розширяється від стану, обумовленого тиском $P_1 = 7$ МПа і температурою $t_1 = 550^\circ\text{C}$, до кінцевого стану під тиском $P_2 = 0,07$ МПа. Визначити роботу розширення. Задачу розв'язати за допомогою таблиць.

Задача 4. Водяна пара масою 1 кг ізотермічно розширяється за температури $t_1 = 320^\circ\text{C}$. У початковому стані пара волога з $x_1 = 0,8$, у кінцевому стані пара характеризується тиском $P_2 = 2,0$ МПа. Визначити кількість підведеного тепла, зміну внутрішньої енергії і роботу розширення. Задачу розв'язати за допомогою таблиць.

Задача 5. Водяна пара масою 1 кг під початковим тиском $p_1 = 6,5$ МПа і зі ступенем сухості 0,95 ізотермічно розширяється. При цьому до неї підводять теплоту $q = 500$ кДж/кг. Визначити, користуючись h s-діаграмою, параметри кінцевого стану пари, роботу розширення, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії. Розв'язати також задачу, якщо розширення відбувається ізобарно. Зобразити процеси на P - v , T - S і h s-діаграмах.

Задача 6. Початковий стан водяної пари представлений параметрами $t_1 = 600^\circ\text{C}$ і $p_1 = 3$ МПа. Із цього стану пара адіабатно розширяється до стану сухої пари ($x_2 = 1$), а потім під постійним тиском охолоджується до ступеня сухості $x_3 = 0,8$. Визначити параметри пари у станах 1, 2, 3 і питомі кількості теплоти та роботу розширення процесу 1–2–3. Показати процес на T - S і h s-діаграмах.

Задача 7. Водяна пара з початковим тиском $P = 3$ МПа і ступенем сухості $x = 0,95$ надходить у пароперегрівач, де його температура підвищується на $\Delta t = 240^\circ\text{C}$. Після пароперегрівача пара ізентропно розширюється у турбіні до тиску $P_2 = 4,0$ кПа. Визначити (за h s-діаграмою) кількість теплоти (на 1 кг пари), підведеної до неї у пароперегрівачу, роботу

циклу Ренкіна і ступінь сухості пари x_2 наприкінці розширення. Визначити також термічний ККД циклу. Визначити роботу циклу і кінцеву ступінь сухості x_2 , якщо після пароперегрівача пара дроселюється до тиску $P'_1 = 0,46$ МПа.

Задача 8. Пара з котла за абсолютного тиску $P = 1,5$ МПа і ступені сухості $x = 0,95$ надходить у паронагрівач, у якому до пари підводиться додаткове тепло під постійним тиском, а температура пари підвищується до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Визначити кількість тепла, підведеного до 1 кг пари, і зміну внутрішньої енергії за допомогою h s-діаграми.

Задача 9. Волога насичена водяна пара, що має початкові параметри $t_1 = 139^\circ\text{C}$ і $x = 0,94$, стискається без теплообміну з навколишнім середовищем. При цьому об'єм пари зменшується у $\varepsilon = 10$ разів. Визначити стан і параметри пари наприкінці процесів стискання, а також зміну питомої ентальпії та роботу 1 кг пари у процесі. Зобразити процес на h s-діаграмі.

Задача 10. Суха насичена водяна пара з початковою температурою $t_1 = 160^\circ\text{C}$ адіабатно стискається так, що об'єм, пари зменшується у 10 разів. Визначити параметри пари у початковому і кінцевому стані, питому роботу стискання і зміну ентальпії пари у процесі. Показати процес на P v-, T S- і h s-діаграмах.

Задача 11. Робоче тіло – водяна пара, що має у початковому стані тиск $P_1 = 3$ МПа і температуру $t_1 = 400^\circ\text{C}$. Маса водяної пари 3 кг. Пара розширяється до тиску $P_2 = 0,04$ МПа. Побудувати процес адіабатного розширення водяної пари на h s-діаграмі. Визначити:

- питомий об'єм і ентальпію у початковому стані;
- температуру, питомий об'єм, ступінь сухості та ентальпію пари у кінцевому стані;
- значення внутрішньої енергії пари до та після розширення;
- роботу розширення пари.

До розрахунку прикласти схему побудови процесу у координатах h - s .

Задача 12. Водяна пара масою 1 кг з початковим тиском $P_1 = 6,5$ МПа і ступенем сухості $x_1 = 0,95$ ізотермічно розширяється. При цьому до неї підводять теплоту $q = 500$ кДж/кг. Визначити, користуючись h s-діаграмою, параметри кінцевого стану пари, роботу розширення, зміну внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії. Розв'язати також завдання, якщо розширення відбувається ізобарно. Зобразити процеси на P v-, T s- та h s-діаграмах.

Задача 13. Перегріта пара масою 1 кг, що має початкові параметри $P_1 = 1,5$ (МПа) і $v_1 = 0,2$ (м³/кг) ізобарно стискається до кінцевого стану, який характеризується ступенем сухості $x_2 = 0,8$. Знайти значення усіх параметрів

у початковому і кінцевому станах (t_1 ; h_1 ; s_1 ; t_2 ; h_2 ; s_2), зміну внутрішньої енергії, роботу стиснення і кількість теплоти, що визначається, за допомогою h s-діаграми.

Задача 14. Водяна пара масою 8 кг при початкових параметрах $P_1 = 5$ бар і температурі $t_1 = 350^\circ\text{C}$ за постійного об'єму охолоджується і стає сухою насиченою. Визначити: кінцеву температуру і тиск сухої насиченої пари; кількість відведеного від пари тепла; об'єм, що займає пара. Зобразити процес на P v-, T s- і h s-діаграмах.

Задача 15. Визначити залежність термічного ККД паротурбінної установки від початкових параметрів пари, якщо під початковим і кінцевим тиском відповідно $P_1 = 3,0$ МПа і $P_2 = 4$ кПа, пара перед турбіною:

- має сухість $x = 0,9$;
- є сухою насиченою;
- перегрітою до температури 450°C .

Задача 16. Водяна пара, що має початкові параметри $P_1 = 5$ МПа і $x_1 = 0,9$, нагрівається під постійним тиском до температури $t_2 = 420^\circ\text{C}$, потім дроселюється до тиску $P_3 = 0,8$ МПа. Під тиском p_3 пара потрапляє у сопло Лаваля, де розширяється до тиску $P_4 = 5$ кПа. Визначити, використовуючи h s-діаграму водяної пари наступне:

- зміну внутрішньої енергії у процесі дроселювання 2–3;
- кінцеву температуру t_3 у процесі дроселювання 2–3;
- кінцеві параметри і швидкість пари на виході з сопла Лаваля, а також критичну швидкість витікання;
- витрату пари у процесі ізоентропного витікання 3–4, якщо відома площа мінімального перетину сопла $f_{\min} = 70 \text{ см}^2$;
- теоретичну потужність турбіни із дроселюванням і без дроселювання (при цьому треба урахувати, що у варіанті без дроселювання витрата пари зміниться у порівнянні з варіантом, коли пара дроселюється);
- термічний ККД турбіни із дроселюванням, а також встановити, як зміниться термічний ККД циклу ПСУ (з урахуванням дроселювання), якщо тиск у конденсаторі P_4 стане рівним $0,02$ МПа.

6. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ

Вологе повітря – це суміш сухого повітря і водяної пари. Тиск вологого повітря дорівнює сумі парціальних тисків сухого повітря ($P_{\text{с.п.}}$) і водяної пари ($P_{\text{п}}$)

$$P = P_{\text{с.п.}} + P_{\text{п.}} \quad (6.1)$$

Оскільки $P_{\text{п}} < P_{\text{с.п.}}$, то сухе повітря, водяну пару, а також їх суміш (вологе повітря) можна вважати ідеальними газами.

Пара, що міститься у вологому повітрі з температурою T , може бути перегрітою (точка В, рис. 6.1). У цьому випадку $P_{\text{п}} < P_{\text{с}}$ для даної T .

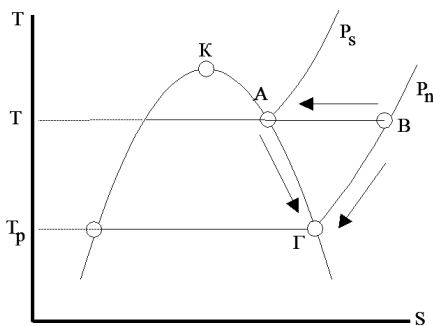


Рисунок 6.1. – Параметри перегрітого повітря у TS-координатах

Вологе повітря, що містить перегріта пара, називається ненасиченим ($P_{\text{п}} < P_{\text{с}}$).

Якщо $P_{\text{п}} = P_{\text{с}}$ за даної температури повітря (точка А, рис. 6.1), то пара є сухою насиченою. Вологе повітря, що містить суху насичену пару, називається насиченим ($P_{\text{п}} = P_{\text{с}}$). Ненасичене вологе повітря можна перевести у стан насичення двома способами:

1. Збільшуючи тиск від $P_{\text{п}}$ до $P_{\text{с}}$ за даної температури вологого повітря T (процес В–А, рис. 6.1), наприклад, збільшуючи кількість пари у повітрі за рахунок випаровування води.
2. Знижуючи температуру вологого повітря при $P_{\text{п}} = \text{const}$ (процес В–Г).

Температура, за якої тиск пари ($P_{\text{п}}$) стає рівним тиску насичення ($P_{\text{с}}$), називається температурою точки роси ($T_{\text{р}}$), і вона вимірюється гігрометром.

Якщо охолоджувати насичене вологе повітря (процес А–Г), то з нього буде виділятися волога, тому що зменшується тиск насичення ($P_{\text{сГ}} < P_{\text{са}}$).

Абсолютна вологість – це маса пари, що міститься у 1 м³ вологого повітря (кг/м³). Для ненасиченого вологого повітря:

$$\rho_{\text{п}} = 1/v_{\text{п}}, \quad (6.2)$$

де $v_{\text{п}}$ – питомий об'єм перегрітої пари, м³/кг.

Для насиченого вологого повітря:

$$v_n = v''; \rho = \rho'' = \frac{1}{v''}; \quad (6.3)$$

де v'' – питомий об'єм сухої насиченої пари, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Крім того, абсолютну вологість можна розрахувати за рівнянням стану ідеального газу:

$$\rho_n = \frac{P_n}{R_n T}; \quad (6.4)$$

$$\rho'' = \frac{P_s}{R_n T}; \quad (6.5)$$

де $R_n = \frac{R_\mu}{\mu_n}$, $\mu_n = 18 \text{ кг/кмоль}$.

Відносною вологістю називається відношення абсолютної вологості повітря (ρ_n) до максимально можливої за даної температури абсолютної вологості повітря (ρ''):

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho''} \cdot 100\%. \quad (6.6)$$

Для насиченого вологого повітря $\rho_n = \rho''$, $\varphi = 100\%$.

Для сухого повітря $\rho_n = 0$, $\varphi = 0$.

Для ненасиченого вологого повітря $0 < \varphi < 100\%$.

Відносна вологість вимірюється психрометром (приладом, що складається з двох термометрів – «сухого» і «мокрого»). Вона є функцією наступних параметрів: $\varphi = f(t_c, (t_c - t_m))$ і визначається за психрометричними таблицями або графіками.

Вологовміст – це відношення маси пари, що міститься у вологому повітрі, до маси сухого повітря ($\text{кг пари/кг с. пов.}$):

$$d = \frac{M_n}{M_{\text{сп}}} = \frac{\rho_n}{\rho_{\text{сп}}}, \quad (6.7)$$

Також вологовміст можна визначити за наступними рівняннями:

$$d = 0,622 \frac{P_n}{P - P_n};$$

$$d = 0,622 \frac{\varphi \cdot P_s}{P - \varphi \cdot P_s}. \quad (6.8)$$

Для насиченого вологого повітря:

$$d = 0,622 \frac{P_s}{P - P_s}. \quad (6.9)$$

Параметри вологого повітря розраховуються за наступними рівняннями:
– молярна маса:

$$\mu = 28,96 - 10,94 \left(\frac{P_n}{P} \right). \quad (6.10)$$

– ентальпія ненасиченого вологого повітря, кДж/кг св. пов.:

$$h = 1,004 \cdot t + d \cdot (2500 + 1,926 \cdot t). \quad (6.11)$$

Для певного атмосферного тиску будується h –діаграма (див. додатки). Звичайно використовуються діаграми, побудовані для середнього значення атмосферного тиску $P = 745$ мм. рт. ст.

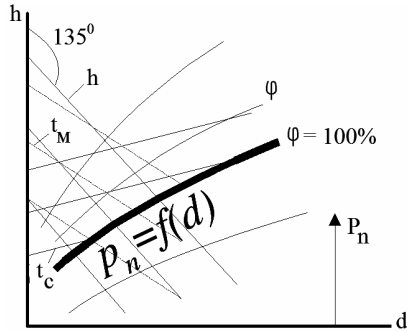


Рисунок 6.2. – Фрагмент h –діаграми

На h –діаграмі (рис. 6.2):

1) лінії постійних ентальпій h (кДж/кг св. пов.) проведено під кутом 135° до вертикалі;

2) t_c – ізоТЕРМИ «сухого» термометра, $^\circ\text{C}$;

3) t_m – ізоТЕРМИ «мокрого» термометра, $^\circ\text{C}$;

4) φ – лінії відносних вологостей, %;

5) $P_n = f(d)$ – лінія парціальних тисків пари.

Приклад користування діаграмою:

За відомими параметрами вологого повітря t_1 і φ_1 знайти d_1 , h_1 , t_p , P_n , P_s .

ІзоТЕРМА точки роси (t_p) проходить (рис. 6.3) через точку перетину ліній $d_1 = \text{const}$ і $\varphi = 100\%$.

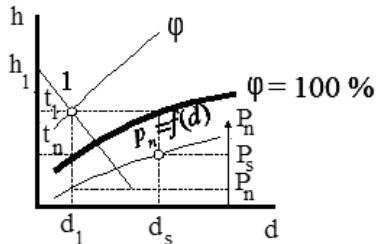


Рисунок 6.3. – Фрагмент h –діаграми

По осі парціальних тисків (P_n) визначаються парціальні тиски пари (P_n) у точці перетину ліній $d_1 = \text{const}$ і $P_n = f(d)$, а також тиск насичення (P_s) у точці перетину ліній $ds = \text{const}$ і $P_n = f(d)$.

Розглянемо основні процеси, що відбуваються у вологому повітрі.

Нагрівання повітря. Вологе повітря з параметрами t_1 , ϕ_1 нагрівається під постійним тиском $p = \text{const}$ до температури t_2 . Витрата повітря G , кг/с.

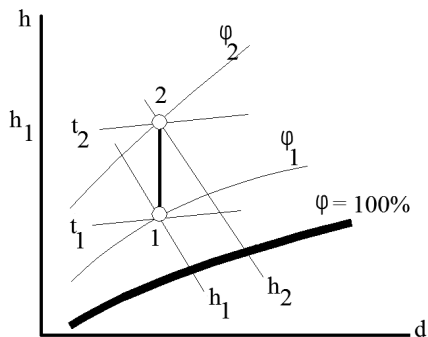


Рисунок 6.4. – Фрагмент h – d –діаграми

У процесі ізобарного нагрівання 1–2 (рис. 6.4) вологовміст не змінюється ($d = \text{const}$), відносна вологість зменшується ($\phi_2 < \phi_1$), ентальпія збільшується ($h_2 > h_1$).

Секундна витрата тепла має вигляд, кДж/с:

$$Q = \frac{G(h_2 - h_1)}{1 + d}. \quad (6.12)$$

Охолодження повітря. Вологе повітря з параметрами t_1 , ϕ_1 охолоджується під постійним тиском $P = \text{const}$ до температури t_2 (t_3). Витрата повітря – G , кг/с.

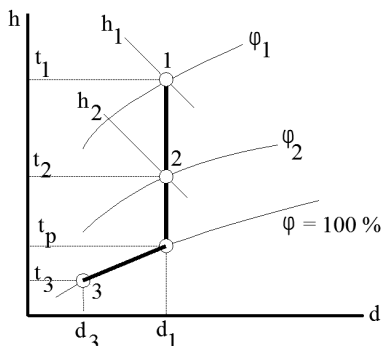


Рисунок 6.5. – Фрагмент h – d –діаграми

Розрізняють два випадки:

1) $t_2 > t_p$ (процес 1–2, рис. 6.5). У цьому випадку:

– вологовміст не змінюється ($d = \text{const}$);

– відносна вологість збільшується ($\varphi_2 > \varphi_1$);

– ентальпія зменшується ($h_2 < h_1$).

Теплота, що виділяється від повітря:

$$q = h_1 - h_2, \frac{\text{кДж}}{\text{кг св.пов.}}; \quad (6.13)$$

$$Q = \frac{G(h_1 - h_2)}{1 + d_2}, \frac{\text{кДж}}{\text{с}}; \quad (6.14)$$

2) якщо температура, до якої охолоджується повітря (t_3), менше температури точки роси (процес 1–3), то повітря, досягнувши стану насичення ($t = t_p = 100\%$), при подальшому зниженні температури, буде залишатися насиченим і з нього буде виділятися волога, оскільки $d_3 < d_1$.

Теплота, що виділяється від повітря у цьому випадку:

$$q = h_1 - h_3 + r(d_1 - d_3), \frac{\text{кДж}}{\text{кг св.пов.}}; \quad (6.15)$$

$$Q = \frac{Gq}{1 + d_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг св.пов.}}; \quad (6.16)$$

де $r = 2500 \text{ кДж/кг}$.

На практиці охолодження повітря до $t < t_p$ широко застосовують з метою видалення з нього вологи (сушіння).

Сушіння матеріалів. У процесі сушіння різних матеріалів повітря є сушильним агентом, і чим вище його температура, а, отже, тиск насичення (p_s), тим більше він може поглинути вологи. Нехай параметри повітря на вході у сушильну камеру рівні t_1 , φ_1 , витрата повітря – G .

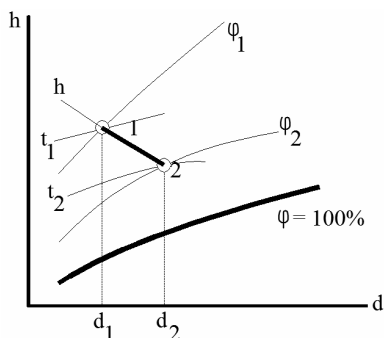


Рисунок 6.6. – Фрагмент hd -діаграми

Ідеальний процес сушіння (без витрат тепла у навколишнє середовище) – це процес 1–2 за постійної ентальпії (рис. 6.6). У процесі сушіння:

– відносна вологість повітря збільшується ($\varphi_2 > \varphi_1$);

- температура зменшується ($t_2 < t_1$);
- вологовміст збільшується ($d_2 > d_1$).

Кількість води, прийнятої повітрям, обчислюється за формулами:

$$M_{\text{вол}} = d_2 - d_1, \frac{\text{кг пари}}{\text{кг с.в. пов.}}; \quad (6.17)$$

$$G_{\text{вл}} = \frac{G(d_2 - d_1)}{1 + d_1}, \frac{\text{кг пари}}{\text{с}}. \quad (6.18)$$

У реальних процесах сушіння $h_2 < h_1$ відбувається через втрати тепла у навколишнє середовище.

Змішування потоків вологого повітря. Нехай змішуються два потоки вологого повітря з параметрами t_1, ϕ_1 , витратою G_1 і t_2, ϕ_2, G_2 .

Витрата, ентальпія і вологовміст суміші, що утворилась, визначають у такий спосіб:

$$G = G_1 + G_2; \quad (6.19)$$

$$h = \left(\frac{G_1}{G}\right)h_1 + \left(\frac{G_2}{G}\right)h_2; \quad (6.20)$$

$$d = \left(\frac{G_1}{G}\right)d_1 + \left(\frac{G_2}{G}\right)d_2. \quad (6.21)$$

Вологовміст і ентальпію потоків (d_1, d_2, h_1, h_2) розраховують за формулами (6.8) і (6.11).

За цими ж формулами після знаходження h і d суміші розраховується температура суміші (t) і відносна вологість (ϕ). Тиск суміші встановлюється дослідним шляхом, а у завданнях повинен бути заданим.

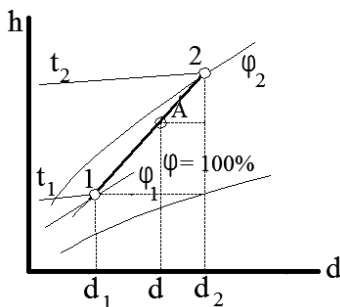


Рисунок 6.7. – Фрагмент h – d діаграми

Для потоків вологого повітря під атмосферним тиском $p_1 = p_2 = p$ параметри суміші зручно знаходити за h – d діаграмою (рис. 6.7).

Спільне розв'язання (6.19) і (6.21) дає наступний результат:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{d_2 - d}{d - d_1}. \quad (6.22)$$

З подоби трикутників випливає:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{d_2 - d}{d - d_1} = \frac{A - 2}{1 - A}, \quad (6.23)$$

тобто точка А, що зображує стан суміші, лежить на прямій 1–2 і ділить її на відрізки А–2 і 1–А, обернено пропорційні витратам потоків.

6.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Психрометр показує наступні параметри: $t_m = 30^\circ\text{C}$, $t_c = 35^\circ\text{C}$. Визначити параметри повітря.

Розв'язання.

На лінії $\phi = 100\%$ відповідно на ізотермі $t_m = 30^\circ\text{C}$ знаходимо точку 1 і через неї проводимо лінію $h = \text{const}$. У перетинанні з ізотермою $t_c = 35^\circ\text{C}$ знаходимо точку 2, яка належить повітрю у приміщенні, де перебуває психрометр. За положенням цієї точки знаходимо для досліджуваного повітря:

$\phi = 70\%$; $d = 25$ г/кг; $P_n = 28$ мм. рт. ст.; $h = 100$ кДж/кг.

Щоб знайти температуру точки роси, проводимо із точки 2 вертикальну пряму $d = f(P_n) = \text{const}$ і у перетинанні з лінією $\phi = 100\%$ знаходимо $t_p = 29^\circ\text{C}$.

Відповідь. $\phi = 70\%$; $d = 25$ г/кг; $P_n = 28$ мм. рт. ст.; $h = 100$ кДж/кг; $t_p = 29^\circ\text{C}$.

Приклад 2. Повітря з параметрами $t = 20^\circ\text{C}$, $P = 1$ кгс/см² і $d = 6$ г/кг св. пов., стискається у компресорі до тиску 4 кгс/см³ і охолоджується потім у трубах. Визначити за якої температури починається виділення води.

Розв'язання.

На h –діаграмі початковий стан позначаємо точкою 1.

Процес стискання повітря зображується лінією 1–2 за $d = \text{const}$.

Температура за стискання підвищується; кінцева точка за стискання виходить, імовірно, за межі діаграми. Наступний процес охолодження зображується також прямою $d = 6$ г/кг св. пов. = const, спрямованою зверху вниз. Виділення вологи починається тоді, коли у процесі охолодження настає стан насичення повітря при $d = 6$ г/кг св. пов. і при $P = 4$ кгс/см³, тобто на лінії $\phi = 100\%$. Для 4 кгс/см² – точка 3.

Таким чином, знаходимо, що виділення вологи починається за температури $t = 27,5^\circ\text{C}$. З діаграми також випливає, що якби у цьому випадку повітря стискалося до 10 кгс/см², то виділення вологи почалося би вже за температури 45°C .

Відповідь. Виділення води починається за температури 45°C .

Приклад 3. У повітрі об'ємом 4 м³ за температури 16°C перебуває 40 г водяної пари. Знайти відносну вологість повітря.

Розв'язання.

Визначаємо густину водяної пари:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{40}{4} = 10 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

За таблицями додатку при $t = 16^\circ\text{C}$ визначаємо густину насиченої пари:

$$\rho_{\text{н.п.}} = 13,6 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Визначаємо відносну вологість:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{н.п.}}} \cdot 100\% \approx \frac{\rho}{\rho_{\text{н.п.}}} \cdot 100\% = \frac{10}{13,6} \cdot 100\% = 78,5\%.$$

Відповідь. Відносна вологість повітря дорівнює 78,5 %.

Приклад 4. Знайти відносну вологість повітря у кімнаті за температури 18°C , якщо за температури 10°C утворюється роса.

Розв'язання.

За таблицями додатку визначаємо тиск водяної пари:

– за температури 10°C : $P_1 = 1,23 \text{ кПа}$;

– за температури 18°C : $P = 2,07 \text{ кПа}$.

Визначаємо відносну вологість:

$$\varphi = \frac{P_1}{P} \cdot 100\% = \frac{1,23}{2,07} \cdot 100\% = 59,4\%.$$

Відповідь. Відносна вологість повітря дорівнює 59,4 %.

Приклад 5. Відносна вологість повітря у кімнаті за температури 16°C становить 65 %. Як зміниться вологість повітря при зниженні температури на 4°C , якщо парціальний тиск водяної пари залишиться постійним?

Розв'язання.

За таблицями додатку визначаємо тиск водяної пари за температури 16°C : $P_{\text{н.п.}} = 1,81 \text{ кПа}$.

Визначаємо тиск:

$$P = \varphi \cdot P_{\text{н.п.}} = 0,65 \cdot 1,81 = 1,18 \text{ кПа}.$$

Визначаємо кінцеву температуру повітря:

$$t = 16 - 4 = 12^\circ\text{C}.$$

За цієї температури: $P'_{\text{н.п.}} = 1,4 \text{ кПа}$.

Нове значення відносної вологості:

$$\varphi = \frac{P}{P'_{\text{н.п.}}} \cdot 100\% = \frac{1,18}{1,4} \cdot 100\% = 84\%.$$

Визначаємо зміну вологості:

$$\Delta\varphi = 84 - 65 = 19\%.$$

Відповідь. Відносна вологість повітря збільшиться на 19 %.

Приклад 6. Відносна вологість повітря ввечері за температури 16°C дорівнює 55%. Чи випаде роса, якщо вночі температура знизиться до 8°C ?

Розв'язання.

За таблицями додатку визначаємо тиск водяної пари за температури 16°C: $P_{\text{н.п.}} = 1,81 \text{ кПа}$.

Визначаємо тиск:

$$P = \varphi \cdot P_{\text{н.п.}} = 0,55 \cdot 1,81 = 0,996 \text{ кПа}.$$

За таблицями додатку визначаємо тиск водяної пари за температури 8°C: $P_{\text{н.п.}} = 1,06 \text{ кПа}$.

Тому що $P_{\text{н.п.}} > P$, то роса не випаде.

Відповідь. За такої температури роса не випаде.

Приклад 7. Для сушіння повітря, що перебуває у балоні ємністю 10 л, у балон ввели шматок хлориду кальцію, який поглинув 0,13 г води. Яка була відносна вологість повітря у балоні, якщо його температура дорівнює 20°C?

Розв'язання.

Визначаємо початкову густину пари води:

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{0,13}{10 \cdot 10^{-3}} = 13 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

За таблицями додатку визначаємо густину водяної пари за температури 20°C: $\rho_{\text{н.п.}} = 17,3 \text{ г/м}^3$.

Визначаємо відносну вологість повітря:

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{н.п.}}} \cdot 100\% = \frac{13}{17,3} \cdot 100\% = 75\%.$$

Відповідь. Відносна вологість повітря дорівнює 75 %.

6.2. Питання для самоконтролю

1. Що називається вологим повітрям?
2. За яких умов вологе повітря можна вважати з достатнім ступенем точності ідеальним газом?
3. Як визначається масовий і мольний вологовміст повітря?
4. У якому випадку вологе повітря називається насиченим, а у якому – ненасиченим?
5. Як визначається ентальпія вологого повітря?
6. Що таке відносна вологість?
7. Чому у процесі випаровування у ідеальній сушарці ентальпію вологого повітря можна вважати постійною?
8. Як визначити стан вологого повітря за допомогою психрометра?
9. Що таке точка роси?
10. Що таке відносна вологість повітря c_p ?
11. Що таке вологовміст повітря?
12. Що таке температура точки роси t_p ?

6.3. Тестові питання

1. Якщо атмосферне повітря не містить водяної пари, то воно називається:

- а) сухим атмосферним повітрям;
- б) ненасиченим вологим атмосферним повітрям;
- в) перенасиченим атмосферним повітрям;
- г) ненасиченим атмосферним повітрям.

2. Якщо атмосферне повітря містить суху насичену пару, то воно називається:

- а) сухим атмосферним повітрям;
- б) насиченим вологим атмосферним повітрям;
- в) ненасиченим вологим атмосферним повітрям;
- г) перенасиченим вологим атмосферним повітрям.

3. Температура, за якої перегріта пара перетворюється у суху насичену пару, називається:

- а) температурою випаровування;
- б) температурою конденсації;
- в) температурою точки роси;
- г) температурою атмосферного повітря.

4. Абсолютна вологість повітря визначається за формулою:

а) $A = \frac{m_{\text{в.п.}}}{V_{\text{в.в.}}};$

б) $d = \frac{m_{\text{в.п.}}}{m_{\text{с.в.}}};$

в) $\varphi = \frac{A}{A_{\text{max}}};$

г) $\varphi = \frac{P_{\text{в.п.}}}{P_{\text{maxв.в.}}}.$

5. Відносна вологість повітря визначається за формулою:

а) $A = \frac{m_{\text{в.п.}}}{V_{\text{в.в.}}};$

б) $d = \frac{m_{\text{в.п.}}}{m_{\text{с.в.}}};$

в) $\varphi = \frac{A}{A_{\text{max}}};$

$$\text{г) } C = C_0 \cdot \varepsilon.$$

6. Вологовміст повітря визначається за формулою:

$$\text{а) } A = \frac{m_{\text{в.п.}}}{V_{\text{в.в.}}};$$

$$\text{б) } d = \frac{m_{\text{в.п.}}}{m_{\text{с.в.}}};$$

$$\text{в) } \varphi = \frac{A}{A_{\text{max}}};$$

$$\text{г) } k = \frac{1}{R}.$$

7. Одиницею вимірювання абсолютної вологості повітря є:

- а) грами вологи;
- б) грами вологи / кг вологого повітря;
- в) кг вологи / м³ вологого повітря;
- г) кг вологи / кг вологого повітря.

8. Вологовміст повітря виражається у:

- а) грамах;
- б) частках одиниці;
- в) відсотках;
- г) грамах вологи / кг сухого повітря.

6.4. Задачі

Задача 1. Повітря з параметрами $t_1 = 20^\circ\text{C}$, і $\varphi_1 = 60\%$, використовували для сушіння, спочатку підігрівали у калорифері до $t_2 = 95^\circ\text{C}$, а потім направляли у сушильну камеру, звідки відпрацьований сушильний агент виходив за температури $t_3 = 35^\circ\text{C}$. Визначити кінцеві параметри повітря: вологовміст, відносну вологість, абсолютну вологість, парціальний тиск водяної пари, температуру мокрого термометра, температуру точки роси, а також витрату повітря і тепла на 1 кг вологи, що випарувалась. Показати визначені параметри відпрацьованого сушильного агента і в цілому процес сушіння на h_d -діаграмі.

Задача 2. Вологе повітря на вході у сушильну установку має параметри: $\varphi_1 = 50\%$ і $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Об'ємна витрата вологого повітря на вході $V_1 = 50 \text{ м}^3/\text{с}$. Визначити кількість води, що випаровується з матеріалу цим повітрям, якщо зміна вологовмісту у камері $\Delta d = 20 \text{ г/кг}$ сухого повітря. Завдання розв'язати з використанням h_d -діаграми. Прийняти тиск рівний $P = 0,1 \text{ МПа}$.

Задача 3. Вологе повітря надходить у сушильну установку з параметрами: $t_1 = 25^{\circ}\text{C}$ і $\phi_1 = 80\%$, а виходить із неї з параметрами $t_2 = 55^{\circ}\text{C}$ і $\phi_2 = 50\%$. Визначити масову і об'ємну витрату вологого повітря на виході з установки, якщо з матеріалу випаровується $M_v = 2,8$ кг/с води. Завдання розв'язати з використанням h_d -діаграми. Прийняти тиск рівний $P = 0,1$ МПа.

Задача 4. Для сушіння використовують повітря з температурою t_1 і з заданим вологовмістом d_1 . У калорифері його підігрівають до температури t_2 і направляють у сушарку, звідки воно виходить із температурою t_3 . Дані, необхідні для розрахунків наведені у таблиці:

№ варіанта	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$d_1, \text{г/кг}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	$t_3, ^{\circ}\text{C}$
1	20	4	90	30
2	25	6	92	32
3	30	8	94	34
4	25	10	96	36
5	30	12	98	38

Визначити: основні параметри вологого повітря (t, d, i, P_n) для основних точок процесу; витрату повітря M і теплоти Q на 1 кг вологи, що випаровується і звести отримані дані у таблицю; навести схему розв'язання на h_d -діаграмі.

Задача 5. Вологе повітря за температури $t_1 = 30^{\circ}\text{C}$ і відносної вологості $\phi = 0,8$, охолоджується у кондиціонері до $t_2 = 18^{\circ}\text{C}$ і подається у приміщення. Визначити кількість вологи, що виділяється з 1 кг повітря, кількість відведеної теплоти і температуру точки роси. Завдання розв'язати за допомогою h_d -діаграми і навести схему розв'язання.

Задача 6. Атмосферне повітря, що має температуру $t_1 = 13^{\circ}\text{C}$ і вологовміст $d = 6,5$ г/кг, нагрівається під постійним тиском у калорифері до температури $t_2 = 45^{\circ}\text{C}$. Побудувати процес нагрівання повітря на h_d -діаграмі, прийнявши барометричний тиск рівним 745 мм. рт. ст. Привести схему побудови процесу нагрівання повітря. Визначити: питому витрату тепла на нагрівання повітря; початкову і кінцеву відносну вологість повітря; парціальний тиск водяної пари у повітрі, що проходить через калорифер.

Задача 7. Для сушіння макаронних виробів використовується повітря за температури $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ з відотною вологістю $\phi_1 = 60\%$, яке у повітряному підігрівачу нагрівається до $t_2 = 105^{\circ}\text{C}$, після чого направляється у сушарку, звідки воно виходить за температури $t_3 = 45^{\circ}\text{C}$. Визначити витрату теплоти і повітря для сушіння $m = 7$ кг/хв макаронних виробів, якщо вміст вологи у макаронах дорівнює 40 % (по масі). Процес насичення вологого повітря вважати ідеальним. Визначити витрату теплоти і повітря для сушіння макаронних виробів, якщо зміст вологи у них підвищиться до 50 % (по масі). Зобразити процеси на h_d -діаграмі.

7. ВИТІКАННЯ І ДРОСЕЛЮВАННЯ ГАЗІВ І ПАРИ

Розгляд закономірностей руху газів і пари по каналах має надзвичайно велике значення для вивчення робочих процесів ряду машин, апаратів і обладнання (парові і газові турбіни, ежектори, реактивні та ракетні двигуни, палинкове обладнання та. ін.).

Процеси витікання звичайно починають вивчати, приймаючи наступні допущення:

а) з часом умови руху газу і його параметри не змінюються – стаціонарне завдання;

б) відсутній теплообмін між потоком газу і зовнішнім середовищем – адіабатне завдання;

в) у всіх точках даного поперечного перерізу каналу швидкість і фізичні параметри газу однакові та змінюються тільки за довжиною каналу – одномірне завдання.

При зазначених допущеннях рух газу (пари) задовольняє умовам сталого руху:

$$M = \frac{f_1 W_1}{v_1} = \frac{f_2 W_2}{v_2} = \dots = \frac{f W}{v} = \text{const}, \quad (7.1)$$

де M – масова секундна витрата газу, кг/с;

$f_1, f_2, \dots, f$ – площі поперечних перерізів каналу, м^2 ;

$v_1, v_2, \dots, v$ – питомі об'єми газу у відповідних перетинах каналу, $\text{м}^3/\text{кг}$;

$W_1, W_2, \dots, W$ – швидкості витікання у відповідних перетинах, м/с.

Стосовно до потоку газу, що рухається зі швидкістю W .

Вираз першого закону термодинаміки має вигляд (у диференціальній формі):

$$dq = du + dl_n + d(W^{2/2}), \quad (7.2)$$

де dq – теплота, що підводиться до потоку;

du – зміна внутрішньої енергії робочого тіла;

dl_n – робота для подолання зовнішніх сил опору (робота «прощтовхування»);

$d(W^{2/2})$ – зміна кінетичної енергії 1 кг робочого тіла, що рухається зі швидкістю W .

Можна довести, що робота «прощтовхування» dl_n дорівнює:

$$dl_n = d(pv). \quad (7.3)$$

Приймаючи до уваги останній вираз (7.2) можна записати у такий спосіб:

$$dq = dh + d(W^{2/2}), \quad (7.4)$$

Якщо порівняти рівняння (7.4) з виразом першого закону термодинаміки, то одержимо:

$$dl' = d(W^{2/2}), \quad (7.5)$$

Що підтверджує сутність технічної роботи, виконаної за рахунок

кінетичної енергії потоку.

Для деякого термодинамічного процесу 1–2, що відбувається за витікання, рівняння (7.4) і (7.5) будуть мати вигляд:

$$q_{1-2} = \Delta h_{1-2} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2}; \quad (7.6)$$

$$\ell_{1-2} = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2}. \quad (7.7)$$

У випадку адіабатного витікання через сопло (рис. 7.1) легко знайти швидкість витікання на виході (перетин 2), використовуючи вираз (7.6). Швидкість W_1 на вході в сопло звичайно зневажають:

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= 0; \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} = -\Delta h_{1-2}, \\ W_1 &= 0; W_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}, \\ W_2 &= 1,414\sqrt{h_1 - h_2}. \end{aligned} \quad (7.8)$$

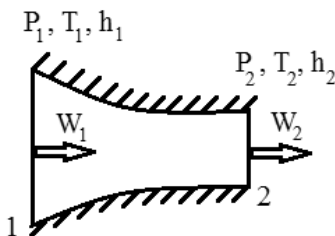


Рисунок 7.1. – Адіабатне витікання через сопло, що звужується

У формулі (7.8) ентальпія виражена у Дж/кг.

Якщо ж вона виражена у кДж/кг то формула (7.8) відповідно прийме вигляд:

$$W_2 = 44,72\sqrt{h_1 - h_2}, \quad (7.9)$$

Швидкість у всіх випадках виходить у м/с.

Формули (7.8) і (7.9) зручно використовувати для визначення адіабатної швидкості витікання водяної пари за допомогою h s–діаграми (рис. 7.2). Звичайно у таких завданнях задається тиск P_1 і температура t_1 на вході у сопло, а також тиск на виході із сопла P_2 . Для визначення швидкості W_2 треба знайти на діаграмі точку 1 початкового стану пари та ентальпію h_1 у цьому стані (рис. 7.2). Потім будується адіабатний процес розширення до перетину з ізобарою P_2 . Так знаходять точку 2 (стан пари на виході із сопла) і визначається ентальпія h_2 . Далі залишається тільки виконати підрахунок швидкості за формулою (7.9) – залежно від одиниць вимірювання ентальпії. Швидкість W_2 можна визначити з більшою точністю за таблицями водяної пари.

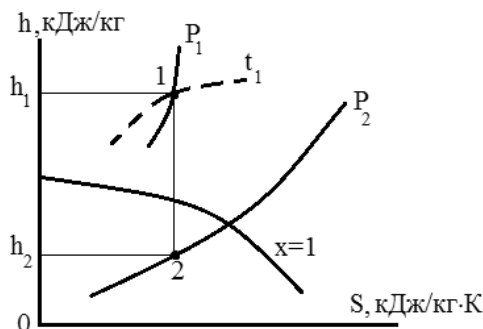


Рисунок 7.2. – Визначення швидкості витікання водяної пари

У тих випадках, коли не відома ентальпія робочого тіла, зручніше визначати швидкість через основні параметри P , v , T . Формулу для визначення швидкості адіабатного витікання ідеального газу легко одержати з виразу (7.7), зневажаючи величиною W_1 , м/с:

$$W_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (7.10)$$

де k і R – відповідно показник адіабати і газова постійна робочого тіла.

Масова витрата газу визначається з виразу (7.1), який після підстановки W_2 (кг/с) і деяких перетворень, що спрощують, приймає вигляд:

$$\dot{M} = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (7.11)$$

де f_2 – вихідний перетин сопла, м²;

P_1 , v_1 – відповідно, тиск (Па) і питомий об'єм (м³/кг) на вході у сопло;

$\beta = P_2/P_1$ – відношення тисків у соплі.

Залежність витрати газу від β за незмінних f_2 , k і умов на вході у сопло (P_1 , T_1 , v_1) показана на рис. 7.3.

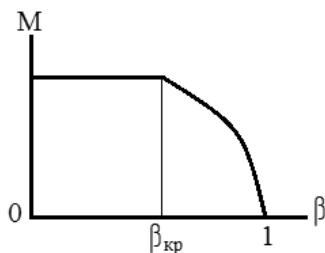


Рисунок 7.3. – Залежність витрати газу

Відношення тисків β , при якому витрата газу стає максимальною, називається критичним і дорівнює:

$$\beta_{\text{кр}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (7.12)$$

Значення $\beta_{\text{кр}}$ залежно від k зведені у таблицю 7.1.

Таблиця 7.1. – Залежність значення критичного відношення тисків від показника адіабати

Вид робочого тіла	k	$\beta_{\text{кр}}$
Одноатомний ідеальний газ	1,67	0,487
Двохатомний ідеальний газ	1,40	0,528
Трьох- і багатоатомні ідеальні гази, перегріта пара	1,29	0,546
Суша насичена пара	1,135	0,577
Для вологої насиченої пари $K = 1,035 + 0,1x$		

За $\beta_{\text{кр}} < \beta < 1$ швидкість газу і витрата ростуть зі зменшенням β . Якщо зменшити β у діапазоні від $\beta_{\text{кр}}$ до 0, то витрата не зміниться, залишаючись максимальною, а швидкість також не змінюється, залишаючись рівною $W_{\text{кр}}$ – критичній швидкості. Отже, за $0 < \beta \leq \beta_{\text{кр}}$ у соплі, що звужується, встановлюється критичний режим витікання:

$$\begin{aligned} M &= M_{\text{макс}}, \\ W_2 &= W_{2 \text{ кр}}, \\ P_2 &= P_{\text{кр}} = P_1 \cdot \beta_{\text{кр}}. \end{aligned}$$

Критична швидкість дорівнює місцевій швидкості звуку:

$$a = \sqrt{k P_{\text{кр}} v_{\text{кр}}} = \sqrt{k R T}.$$

Щоб одержати вираз для $M_{\text{макс}}$ і $W_{2 \text{ кр}}$ треба підставити $\beta = \beta_{\text{кр}}$, (7.12), у формули (7.10) і (7.11). Таким чином, одержимо:

$$\dot{M}_{\text{макс}} = f_2 \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{P_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \quad (7.13)$$

$$W_{2 \text{ кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_1 v_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1}. \quad (7.14)$$

Вищевикладене свідчить що, у соплі, яке звужується, за режиму $0 < \beta \leq \beta_{\text{кр}}$ відбувається неповне розширення робочого тіла (від P_1 до P_2) і швидкість зростає тільки до $W_{2 \text{ кр}}$. Таким чином, потенційна енергія робочого тіла використовується неповно. У зв'язку з цим при розв'язанні завдань на витікання необхідно спочатку знайти $\beta = P_2/P_1$. Якщо сопло звужується і $\beta \leq \beta_{\text{кр}}$, то розширення буде відбуватися до $P_{\text{кр}}$, що позначиться на величині W_2 – див. рис. 7.4.

$$W_2 = W_{2\text{кр}} = 44,72\sqrt{h_1 - h_{\text{кр}}}. \quad (7.15)$$

Повне використання можливостей робочого тіла, розширення від P_1 до P_2 за $\beta < \beta_{\text{кр}}$, відбувається у комбінованих соплах або соплах Лаваля. Ці канали мають частини, що звужуються або розширяються. У таких соплах можна одержувати надзвукові швидкості. Якщо у процесі, зображеному на рис. 7.4, використовувати сопло Лаваля, то швидкість на виході із сопла буде дорівнювати:

$$W_{2\text{кр}} = 44,72\sqrt{h_1 - h_2}.$$

При проходженні газу або пари через звуження каналу (діафрагма, вентиль, клапан і т.д.) відбувається зниження його тиску без здійснення зовнішньої роботи. Цей необоротний процес називається дроселюванням.

При відсутності теплообміну відповідно до рівняння (7.6) будемо мати:

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{2}(W_2^2 - W_1^2), \quad (7.16)$$

Де індекси «1» і «2» відповідають перетинам до і після звуження каналу. За умови, що швидкості W_1 і W_2 мало відрізняються одна від одної (перетини 1 і 2 рівні), одержуємо:

$$h_1 = h_2 \quad (7.17)$$

Одержана рівність показує, що ентальпія у результаті дроселювання не змінюється. Але цей висновок не відноситься до проміжних станів газу, тобто процес дроселювання не є ізоентальпійним. Рівність (7.17) справедлива тільки для перетинів, досить віддалених від звуження каналу.

Процес дроселювання є необоротним процесом, тому на термодинамічних діаграмах його зображують лише умовно (пунктир 1–2 на рис. 7.5 і 7.6).

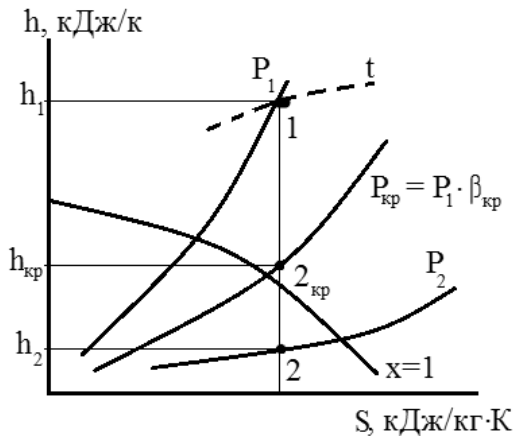


Рисунок 7.4. – Процес адіабатного витікання за $\beta < \beta_{\text{кр}}$

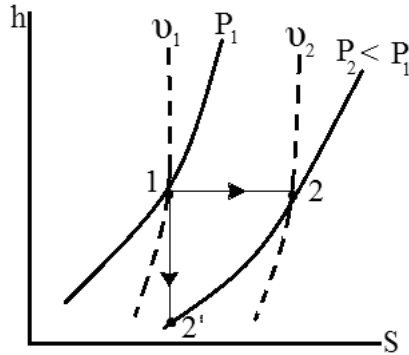


Рисунок 7.5. – Дроселювання ідеального газу ($T_1 = T_2$)

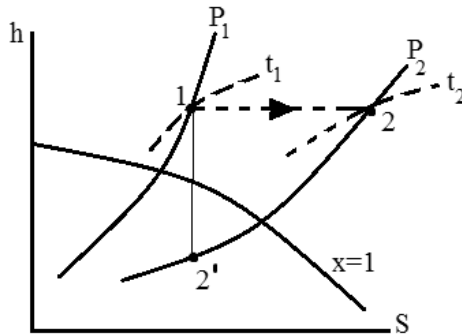


Рисунок 7.6. – Дроселювання реального газу ($t_1 \neq t_2$)

Сутність процесу дроселювання ідеального і реального газів, а також питання про зміну температури зрозумілі з рис. 7.5 і 7.6, де процес дроселювання 1–2 розділений на два процеси: 1–2' – адіабатне розширення у дроселі та 2'–2 – ізобарне гальмування за дроселем.

7.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Визначити швидкість витікання кисню з резервуару через сопло, що звужується, якщо тиск і температура у резервуарі постійні та відповідно дорівнюють 40 бар і 80⁰С. Тиск середовища, у якому відбувається витікання, дорівнює 26 бар.

Розв'язання.

За таблицями додатку приводимо параметри у систему СІ:

$T = 353 \text{ К};$

$P_1 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па};$

$$P_2 = 26 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

За таблицями додатку знаходимо питому газову постійну і показник адіабати для кисню:

$$R_{O_2} = 260 \text{ Дж/кг·град;}$$

$$k = 1,4.$$

Визначаємо швидкість витікання газу:

$$W = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} 260 \cdot 353 \left[1 - \left(\frac{26 \cdot 10^5}{40 \cdot 10^5} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 272 \text{ м/с.}$$

Відповідь. Швидкість витікання газу дорівнює 272 м/с.

Приклад 2. Визначити масову витрату кисню, який витікає через сопло, що звужується, з резервуару під тиском 50 бар і за температури 30°C, у середовище з тиском 30 бар. Площа вихідного перетину сопла 20 мм².

Розв'язання.

За таблицями додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T = 303 \text{ К;}$$

$$P_1 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

$$P_2 = 30 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

$$f = 0,00002 \text{ м}^2.$$

За таблицями додатку знаходимо питому газову постійну і показник адіабати для кисню:

$$R_{O_2} = 260 \text{ Дж/кг·град;}$$

$$k = 1,4.$$

Визначаємо питомий об'єм газу:

$$v = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{260 \cdot 303}{50 \cdot 10^5} = 0,016 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Визначаємо масову витрату газу:

$$\begin{aligned} \dot{M} &= f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = \\ &= 0,00002 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \frac{50 \cdot 10^5}{0,016} \left[\left(\frac{30 \cdot 10^5}{50 \cdot 10^5} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{30 \cdot 10^5}{50 \cdot 10^5} \right)^{\frac{2,4}{1,4}} \right]} = 0,024 \text{ кг/с.} \end{aligned}$$

Відповідь. Масова витрата кисню дорівнює 0,024 кг/с.

Приклад 3. Визначити дійсну швидкість витікання повітря з сопла, що звужується, якщо необхідно повністю використати перепад тиску при витіканні газу від початкових параметрів 28 бар і 300°C до 19 бар. Швидкісний коефіцієнт дорівнює 0,9.

Розв'язання.

За таблицями додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T = 573 \text{ К};$$

$$P_1 = 28 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_2 = 19 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

За таблицями додатку знаходимо питому газову постійну і показник адіабати для повітря:

$$R_{\text{пов}} = 287 \text{ Дж/кг}^\circ\text{град};$$

$$k = 1,4.$$

Визначаємо дійсну швидкість витікання:

$$W_d = \varphi \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = 0,9 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} 287 \cdot 313 \left[1 - \left(\frac{20 \cdot 10^5}{26 \cdot 10^5} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 313 \text{ м/с}.$$

Відповідь. Дійсна швидкість витікання повітря рівна 313 м/с.

Приклад 4. Визначити масову витрату водяної пари з початковими параметрами 20 бар і 300°C , що витікає із сопла Лавалю у середовище з тиском 5 бар, якщо задана площа вихідного перетину сопла 100 мм^2 .

Розв'язання.

За таблицями додатку приводимо параметри у систему СІ:

$$T = 573 \text{ К};$$

$$P_1 = 20 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$f = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Користуючись h_s -діаграмою на перетині ліній тиску 20 бар і температури 300°C знаходимо початкову точку стану, і за нею визначаємо значення ентальпії:

$$h_1 = 3029 \text{ кДж/кг}.$$

Користуючись h_s -діаграмою на перетині ліній тиску 5 бар і температури 300°C знаходимо кінцеву точку стану, і за нею визначаємо значення ентальпії та питомого об'єму:

$$h_2 = 2732 \text{ кДж/кг};$$

$$v_2 = 0,36 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо швидкість витікання пари:

$$W = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2} = 44,76 \sqrt{3029 - 2732} = 771 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Визначаємо масову витрату пари:

$$M = f \frac{W}{v_2} = 100 \cdot 10^{-6} \frac{771}{0,36} = 0,214 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Відповідь. Масова витрата пари дорівнює $0,214 \text{ кг/с}$.

7.2. Питання для самоконтролю

1. Як змінюються параметри газу при витіканні із сопла, що звужується?
2. Від яких факторів залежить швидкість витікання газу із сопла?
3. При якому термодинамічному процесі відбувається витікання газів і пари?
4. На якому з графіків на h_s -діаграмі представлений процес гальмування газу у дифузорі за наявності тертя?
5. Як графічно зображується процес витікання пари із сопла на h_s -діаграмі за відсутності тертя?
6. Від чого залежить величина критичного відношення тисків $\beta_{кр} = \frac{P_2}{P_1}$ за витіканні газу з сопла, що звужується?
7. Який вигляд у диференціальній формі має рівняння першого закону термодинаміки для газового потоку?
8. При якому значенні відношення тиску $\beta = \frac{P_2}{P_1}$ у соплі, що звужується, відбувається максимальна витрата за умови повного розширення газу?
9. При якому відношенні тисків $\beta = \frac{P_2}{P_1}$ найбільш ефективно відбувається витікання з сопла, що звужується?
10. На якому із графіків представлений процес витікання газу із сопла?
11. Якій витраті газу, при витіканні його з сопла, відповідає критична швидкість витікання?
12. При якому значенні відношення тисків $\beta = \frac{P_2}{P_1}$ ефективно працює сопло Лавалю?
13. Як зображується розташовувана робота у P - v координатах?
14. Що називається коефіцієнтом швидкості?

7.3. Тестові питання

1. Чому дорівнює теоретична швидкість газу за адіабатного витікання через сопло?
 - а) $[2(P_1 - P_2)]^{0.5}$;
 - б) $(2P_1/P_1)^{0.5}$;
 - в) $(2P_2/P_2)^{0.5}$;
 - г) $[2(h_1 - h_2)]^{0.5}$.

2. Що таке дроселювання газу (пари)?

- а) зниження тиску у гідравлічних опорах;
- б) зниження температури газу;
- в) переміщення газу;
- г) витікання газу через сопла.

3. Як змінюється ентальпія газу при дроселюванні?

- а) зменшується;
- б) збільшується;
- в) коливається близько деякого середнього значення;
- г) залишається незмінною.

4. Як змінюється температура газу при дроселюванні?

- а) зменшується;
- б) збільшується;
- в) коливається близько деякого середнього значення;
- г) залишається незмінною.

5. За яким з виразів можна розрахувати швидкість витікання W ?

а) $\sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot P_1 v_1 \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}$;

б) $\sqrt{2(h_1 - h_2)}$;

в) $f \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}$;

г) $f \cdot W \cdot \rho_2$.

6. За яким з виразів можна визначити секундну витрату газу за витікання m ?

а) $\sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot P_1 v_1 \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}$;

б) $\sqrt{2(h_1 - h_2)}$;

в) $f \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}$;

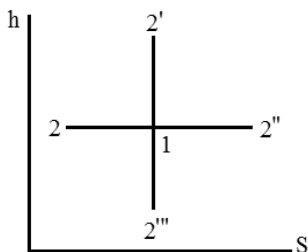
г) $f \cdot W \cdot \rho_2$.

7. Критичне відношення тисків $\beta_{кр} = \frac{P_2}{P_1}$ залежить:

- а) від температури на зрізі сопла $T_{2\text{сер}}$;

- б) від тиску на зрізі сопла $P_{2\text{сер}}$;
- в) від температури і тиску у резервуарі ($P_1 T_1$);
- г) від показника адіабати k .

8. Який з процесів, зображених на графіку, відповідає адіабатному процесу дроселювання з точки 1.



- а) 1–2;
- б) 1–2';
- в) 1–2'';
- г) 1–2'''.

9. Ефект Джоуля–Томсона проявляється при дроселюванні:

- а) ідеального газу;
- б) реального газу;
- в) будь-якого газу.

7.4. Задачі

Задача 1. Волога пара під початковим тиском $P_1 = 1,6$ МПа і зі ступенем сухості $x = 0,98$ витікає через сопло, що звужується, з перетином $f_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ у атмосферу. Визначити секундну витрату пари, якщо швидкісний коефіцієнт сопла $\varphi = 0,92$.

Задача 2. Водяна пара під тиском p_1 і за температури t_1 , дроселюється до тиску p_2 . Визначити невідомі параметри пари h , v , s на початку і наприкінці дроселювання та втрату роботи $D_h = T_0 \Delta s$. Прийняти температуру навколишнього середовища рівною t_0 . Зобразити процес на hs -діаграмі. Дані для розрахунків: $t_1 = 550^\circ\text{C}$, $P_1 = 30$ МПа, $P_2 = 0,2$ МПа, $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

Задача 3. До сопла парціальної газової турбіни підводять продукти згоряння палива з початковими параметрами $P_1 = 1,3$ МПа і $t_1 = 550^\circ\text{C}$. У соплі тиск знижується до $P_2 = 0,2$ МПа. Вважати продукти згоряння ідеальним газом з $R = 280 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ і $k = 1,33$. Визначити:

- 1) який тип сопла застосований у турбіні;
 - 2) параметри і швидкість газу у вихідному перетині сопла;
 - 3) витрату газу, якщо мінімальний діаметр сопла $d_{\min} = 10$ мм.
- Втратами на тертя зневажити.

Задача 4. Водяна пара тече по соплу Лавалю. Параметри пари у вхідному перетині сопла $P_1 = 5$ МПа, $t_1 = 600^\circ\text{C}$. Об'ємна витрата пари на вході у сопло $V_1 = 1,6$ м³/с. Тиск пари у вихідному перетині сопла $P_2 = 0,2$ МПа. Приймаючи для пари $\beta_{\text{кр}} = 0,55$, визначити її параметри і швидкості у вихідному та критичному перетинах, площу вихідного і критичного перетинів. Втратами на тертя у звуженій частині сопла зневажити, а для частини, що розширюється, прийняти швидкісний коефіцієнт $\phi = 0,95$.

Задача 5. Із сопла Лавалю у навколишнє середовище виходить струмінь газу (водяна пара) зі швидкістю $W_2 = 1200$ м/с і масовою витратою $G_m = 6,22$ кг/с. Параметри газу на вході у сопло наступні: надлишковий тиск $P_1 = 10$ МПа, температура $t_1 = 315^\circ\text{C}$. Барометричний тиск відповідає нормальним фізичним умовам. Діаметр вихідного зрізу сопла $d_2 = 50$ мм. Визначити температуру газу на виході із сопла та найменший діаметр сопла.

Задача 6. Волога пара з початковою температурою $t_1 = 260^\circ\text{C}$ і ступенем сухості $x_1 = 0,96$ дроселюється до тиску $P_2 = 0,6$ МПа. Знайти кінцевий ступінь сухості, питомий об'єм, зміну ентропії, ентальпію та температуру кінцевої точки.

Задача 7. Волога пара з початковими параметрами $P_1 = 7$ МПа і $t_1 = 560^\circ\text{C}$ розганяється у соплі Лавалю до максимальної швидкості $W_2 = 1000$ м/с. Коефіцієнт швидкості сопла $\phi = 0,95$. Визначити тиск у навколишньому середовищі на зовнішньому зрізі сопла і температуру потоку на виході з сопла. Яка буде швидкість при витіканні пари через не профільований отвір?

Задача 8. Кисень з початковими параметрами $P_1 = 6$ МПа і $t_1 = 300^\circ\text{C}$ витікає через сопло у середовище, тиск у якому постійний і дорівнює $P_2 = 0,42$ МПа. Вважати кисень ідеальним газом з $k = 1,36$, визначити:

- 1) параметри і швидкість у вихідному перетині сопла, що звужується, за швидкісного коефіцієнту $\phi = 0,95$;
- 2) параметри і швидкість у вихідному перетині ідеального сопла Лавалю за розрахункового режиму;
- 3) витрату кисню при мінімальній площі каналу $F_{\text{min}} = 2$ см².

Задача 9. Визначити швидкість і ступінь сухості водяної пари у вихідному перетині, а також відношення витрат пари для двох сопел Лавалю:

- 1) пара на вході у сопло має параметри $P_1 = 5$ МПа і $t_1 = 510^\circ\text{C}$, а у вихідному перетині сопла тиск пари дорівнює $P_2 = 0,1$ МПа;
- 2) перед потраплянням у сопло пара дроселюється від заданого стану (P_1 і t_1) до тиску $P'_1 = 2$ МПа, а потім у соплі розширюється до тиску $P_2 = 0,1$ МПа.

Прийняти, що площі вихідних перетинів обох сопел однакові. Зобразити розраховані процеси на h s-діаграмі.

Задача 10. Перегріта пара з параметрами $P_1 = 4$ МПа і $t_1 = 450^\circ\text{C}$ дроселюється у регульовальному клапані турбіни до $P_2 = 2,8$ МПа, а потім адіабатно розширюється у ній до кінцевого тиску $P_3 = 0,005$ МПа. Визначити параметри пари після дроселювання і втрату роботи у результаті дроселювання.

Задача 11. Визначити швидкість адіабатного витікання газу ($k = 1,4$) через сопло Лавалю, якщо початкові параметри $P_1 = 0,8$ МПа, $t_1 = 700^\circ\text{C}$, а кінцевий тиск $P_2 = 0,1$ МПа. Якою була б швидкість витікання, якби сопло звужувалось?

Задача 12. Водяна пара під тиском $P_1 = 5$ МПа і за температури $t_1 = 550^\circ\text{C}$ надходить з початковою швидкістю $W_1 = 200$ м/с до сопел Лавалю. Тиск за соплами $P_{\text{ср}} = 1,5$ МПа. Визначити розміри вихідного перетину і довжину сопла, якщо витрата пари складає $m = 1,5$ кг/с.

Задача 13. CO_2 під тиском $P_1 = 6$ МПа і за температури $t_1 = 500^\circ\text{C}$ надходить до сопел, що звужуються, тиск за якими $P_{\text{ср}} = 2$ МПа. Визначити швидкість витікання газу і площу вихідного перетину сопла, якщо витрата газу $m = 1,8$ кг/с, а швидкісний коефіцієнт сопла $\phi = 0,95$. Зобразити процес на TS-діаграмі.

Задача 14. Водяна пара надходить у сопло під тиском $P_0 = 30$ бар і за температури $t_0 = 350^\circ\text{C}$ і адіабатно розширюється при витіканні через комбіноване сопло у середовище з тиском $P_2 = 0,1$ бар. Зневажаючи початкову швидкість витікання, визначити мінімальний і вихідний перетин сопла. Витрата пари через сопло складає $M = 500$ кг/год. Швидкісний коефіцієнт сопла $\phi = 0,95$. Розрахунки провести для теоретичного процесу витікання.

Задача 15. У приміщенні компресорної станції об'ємом $V = 0,45$ м³ відбулася розгерметизація трубопроводу, по якому транспортується горючий газ (пропіланий) під тиском $P_1 = 0,9$ МПа і за температури $T_1 = 305$ К. Через наскрізний отвір, що утворився у трубопроводі, площею $f = 5,1 \cdot 10^{-4}$ м² газ виходить у приміщення. Розрахувати, через який час τ у повному об'ємі компресорної станції може утворитися вибухонебезпечна суміш, а також середню молекулярну масу, густину, питомий об'єм та ізобарну масову теплоємність суміші, якщо її температура $T = 293$ К, а тиск $P = 100$ кПа. Коефіцієнт витрати отвору $\xi = 0,7$. Повітрообмін не враховується.

Задача 16. Витрата повітря при його русі усередині труби круглого поперечного перерізу діаметром $d = 0,22$ м становить $Q = 0,4$ м³/с. Розрахуйте величину середньої швидкості повітря і швидкість на осі труби.

Задача 17. Визначити швидкість адіабатного витікання та діаметри мінімального і вихідного перетину сопла Лаваля, якщо початкові параметри перегрітої пари $P_1 = 3$ МПа, $t_1 = 400^\circ\text{C}$, кінцевий тиск $P_2 = 0,2$ МПа і витрата пари $G = 5$ кг/с.

Задача 18. Визначити швидкість адіабатного витікання і витрату повітря, що витікає з ємності необмеженого об'єму через циліндричне сопло у навколишнє середовище з тиском $P_n = 15$ бар. Параметри повітря у ємності наступні: $P_1 = 20$ бар, $T_1 = 623$ К. Діаметр сопла дорівнює $d = 35,6$ мм.

Задача 19. У газовій турбіні параметри повітря перед його адіабатним витіканням з розрахункового сопла Лаваля наступні: $P_1 = 20$ бар, $T_1 = 973$ К, $P_2 = 0,5$ бар. У секунду через сопло витікає 20 кг повітря. Визначити швидкість витікання повітря у найбільш вузькому перетині сопла, а також на виході і діаметри цих перетинів.

Задача 20. Визначити швидкість адіабатного витікання повітря з циліндричного отвору і витрату за наступних даних: $P_1 = 24$ бари, $T_1 = 293$ К, $P_n = 1$ бар, діаметр отвору $d = 3,56$ см.

Задача 21. Визначити витрату повітря через сопло, що звужується, якщо відомі наступні дані: $P_1 = 5$ бар, $T_1 = 600$ К, $P_n = 1$ бар, $d = 10$ мм. Як зміниться витрата за збільшення P_n до 2 бар або 4 бар.

Задача 22. Газ витікає з ємності необмеженого об'єму, у якій підтримується тиск $P_1 = 10$ бар і температура $T_1 = 400$ К. Тиск навколишнього середовища $P_2 = 5$ бар. Визначити режим витікання і швидкість витікання для випадків, коли у ємності знаходяться гелій, водень або вуглекислий газ.

Задача 23. Визначити швидкість витікання W і витрату m кисню, що витікає з ємності необмеженого об'єму через отвір діаметром 15 мм. Тиск і температура у ємності відповідно дорівнюють $P_1 = 20$ бар, $T_1 = 300$ К. Тиск навколишнього середовища $P_n = 1$ бар. Як зміниться W і m , якщо у 2 рази збільшиться діаметр отвору?

Задача 24. Параметри повітря, яке витікає з сопла Лаваля, наступні: $P_1 = 40$ бар, $T_1 = 523$ К, $P_n = 1$ бар. Діаметр критичного перетину $d_{кр} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Визначити витрату повітря і діаметр вихідного перетину сопла d_2 .

8. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ЦИКЛИ ТЕПЛОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Другий закон термодинаміки встановлює спрямованість і умови протікання природних процесів. Так само, як і перший закон термодинаміки, він був виведений на підставі експериментальних даних.

Уперше сутність цього закону виклав у 1824 році французький інженер С. Карно. Він уперше вказав на можливість перетворення теплоти у корисну роботу у двигунах лише при наявності двох джерел теплоти: одного з більшою високою температурою (нагрівач з температурою T_2) і іншого з меншою температурою (холодильник з температурою T_1).

Пізніше Р. Клаузіус і В. Томсон (Кельвін) дали найбільш загальні формулювання другого закону термодинаміки, з яких випливає, що:

1. Неможливий процес, при якому теплота переходила б мимовільно від холодних тіл до тіл нагрітих.

2. Не вся теплота, отримана від тепловіддавача, може перейти у роботу, а тільки частина її. Частина теплоти повинна перейти у теплоприймач.

У ізольованій термодинамічній системі через деякий проміжок часу встановлюється внутрішня рівновага, при якій робоче тіло по всій масі має однакову температуру і тиск.

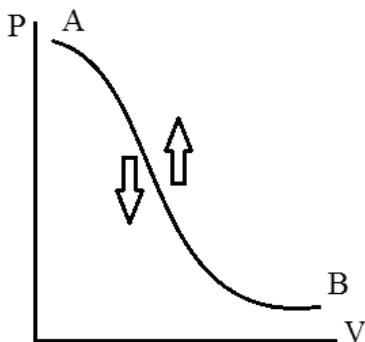


Рисунок 8.1. – Лінії оборотних прямого А–В і зворотного В–А процесів на PV–діаграмі

Для будь-якої термодинамічної системи можна представити два стани, між якими буде проходити два процеси: один від першого стану до другого і інший, навпаки, від другого стану до першого. Перший процес називають прямим, другий – зворотним. Якщо після прямого процесу впливає зворотний і при цьому термодинамічна система вертається у вихідний стан, то такі процеси прийнято вважати оборотними. При оборотних процесах система у зворотному процесі проходить через ті ж рівноважні стани, що і у прямому процесі. При цьому ні у навколишньому середовищі, ні у самій

системі не виникає ніяких залишкових явищ, тобто не має значення іде процес А–В або В–А (рис. 8.1).

Розрізняють механічно і термічно оборотні процеси.

У механічно оборотному процесі обмін енергією між системою і навколишнім середовищем протікає у формі роботи при нескінченно малій різниці тисків. У термічно оборотному процесі термодинамічна система обмінюється з навколишнім середовищем енергією у формі теплоти при нескінченно малій різниці температур.

Будь-який рівноважний термодинамічний процес зміни стану робочого тіла буде завжди оборотним. Оборотні процеси є ідеальними.

Дійсні термодинамічні процеси відбуваються при кінцевій різниці тисків і температур робочого тіла та навколишнього середовища і тому є не рівноважними. Такі процеси необоротні.

Необоротний термодинамічний процес – це процес, при якому система не повертається у вихідний стан після зворотного процесу. Усі необоротні процеси протікають у напрямку досягнення у термодинамічній системі рівноваги, тобто вирівнювання у ній тисків, температур, концентрацій.

При однократному розширенні робочого тіла можна одержати обмежену кількість роботи. Тому розімкнутий процес непридатний для безперервного перетворення теплоти у роботу. Для повторного одержання роботи необхідно повернути робоче тіло у вихідний стан, тобто стиснути робоче тіло. На стискання робочого тіла повинна бути витрачена робота. Ця робота підводиться від якого-небудь зовнішнього джерела. Причому процес стискання робочого тіла повинен здійснюватися за шляхом, відмінним від шляху процесу розширення. А якщо ні, то сумарна робота, отримана у результаті кругового процесу, буде дорівнювати нулю. Тому шлях процесу стискання вибирається таким, щоб робота стискання за абсолютною величиною була менше роботи розширення. На рис. 8.2 наведений круговий процес, у якому робоче тіло розширяється за кривою 1–3–2. При цьому робота розширення чисельно дорівнює площі 1–3–2–4–5–1. Процес повернення робочого тіла з кінцевого стану 2 у початковий стан 1 може здійснюватися одним з наступних шляхів:

1. По кривій стискання 2–3–1. При цьому робота стискання (площа 2–3–1–5–4–2) буде дорівнювати роботі розширення (площа 1–3–2–4–5–1). У результаті сумарна робота у такому круговому процесі дорівнює нулю.

2. По кривій стискання 2–6–1, яка розташована над кривою розширення 1–3–2. При цьому робота стискання (площа 2–6–1–5–4–2) більше роботи розширення (площа 1–3–2–4–5–1). Сумарна робота у такому круговому циклі буде негативною.

3. По кривій стискання 2–7–1, яка розташована нижче кривої розширення. У цьому круговому процесі робота розширення (площа 1–3–2–4–5–1) більше роботи стискання (площа 2–7–1–5–4–2), а площа, обмежена замкненою кривою 1–3–2–7–1, являє собою роботу циклу. Отже, щоб робота була позитивною, потрібно, щоб крива стискання 2–7–1 на PV-діаграмі була

розташована нижче кривої розширення 1–3–2. Багаторазово повторюючи такий круговий процес, можна за рахунок підведення теплоти одержати будь-яку кількість роботи.

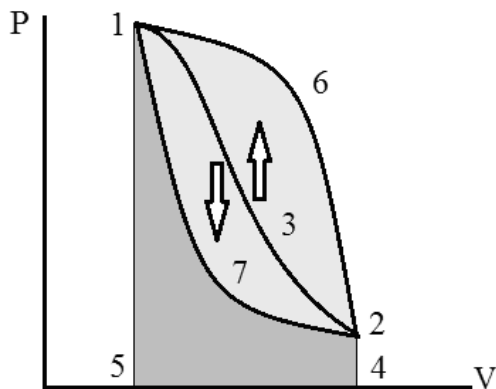


Рисунок 8.2. – Круговий процес

Цикли, у яких теплота перетворюється у позитивну роботу, називаються прямими. Такі цикли на PV -діаграмі протікають за годинниковою стрілкою. За прямими циклами працюють теплові двигуни.

Цикл, у якому виходить негативна робота, називається зворотним. У ньому робота стискання більше роботи розширення. За зворотними циклами працюють холодильні машини.

Цикли можуть бути оборотними та необоротними. Оборотним термодинамічним циклом називається цикл, усі процеси якого оборотні. Необоротним термодинамічним циклом називається цикл, у якому хоча б один зі складових його процесів необоротний.

Ступінь досконалості перетворення теплоти у механічну роботу у термодинамічному циклі оцінюється термічним коефіцієнтом корисної дії (ККД). Термічним ККД термодинамічного циклу називається відношення роботи, виконаної у прямому оборотному термодинамічному циклі, до теплоти, повідомленої робочому тілу від зовнішніх джерел:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}, \quad (8.1)$$

де q_1 – тепло віддане у циклі робочому тілу тепловіддавачем;

q_2 – тепло віддане у циклі робочим тілом теплоприймачу;

$q_1 - q_2$ – тепло, перетворене у циклі у механічну роботу l .

Термічний ККД термодинамічного циклу показує, яка кількість одержаної теплоти машина перетворює у роботу у конкретних умовах протікання ідеального циклу. Чим більше величина η_t , тим досконаліше цикл

і теплова машина. Значення термічного ККД термодинамічного циклу завжди менше одиниці.

Ідеальний термодинамічний цикл називається циклом Карно і являє собою замкнений процес, чинений робочим тілом у ідеальній тепловій машині при наявності двох джерел теплоти: нагрівача (гарячого джерела) з температурою T_1 і холодильника (холодного джерела) з температурою T_2 . Цикл Карно на PV -діаграмі зображений на рис. 8.3.

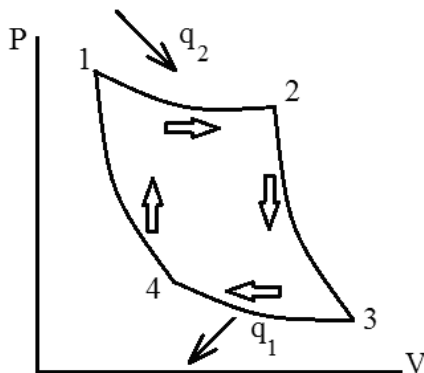


Рисунок 8.3. – Прямий цикл Карно

Процеси 1–2 і 3–4 є ізотермічними, а 2–3 і 4–1 – адіабатними. Початкова температура робочого тіла у циклі приймається рівною температурі нагрівача T_1 . При ізотермічному розширенні від стану 1 до стану 2 робоче тіло одержує від нагрівача кількість теплоти q_1 за температури T_1 . На ділянці 2–3 робоче тіло адіабатно розширяється. При цьому температура робочого тіла знижується від T_1 до T_2 , а тиск падає від P_2 до P_3 . При стисканні за ізотермою 3–4 від робочого тіла виділяється до холодильника кількість теплоти q_2 за температури T_2 .

Подальше стискання за адіабатою 4–1 приводить до підвищення температури робочого тіла від T_2 до T_1 , а робоче тіло повертається у початковий стан. Сумарна робота циклу $l_{\text{ц}}$ графічно зображується площею 1–2–3–4–1. Термічний ККД циклу визначається наступним чином:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (8.2)$$

З рівняння (8.2) випливає наступне:

1. Термічний ККД циклу Карно залежить тільки від абсолютних температур нагрівача T_1 і холодильника T_2 . Він зростає зі збільшенням температури T_1 і зі зменшенням T_2 , тобто чим більше різниця температур $T_1 - T_2$, тем вище ККД циклу Карно.

2. Термічний ККД циклу Карно завжди менше одиниці. Рівність $\eta_t = 1$ можлива тільки за $T_2 = 0$ або $T_1 = \infty$, що практично неможливо реалізувати.

Теплота q_1 , що підводиться до робочого тіла у циклі Карно, не може бути повністю перетворена у роботу, значна кількість теплоти виділяється до теплоприймача.

3. Термічний ККД циклу Карно за $T_1 = T_2$ дорівнює нулю, таким чином, неможливе перетворення теплоти у роботу, якщо всі тіла системи мають однакову температуру, тобто перебувають між собою у тепловій рівновазі.

4. Термічний ККД циклу Карно не залежить від обладнання двигуна і фізичних властивостей робочого тіла, а залежить лише від температур нагрівача T_1 і холодильника T_2 . Це положення відоме під назвою «теорема Карно».

Теплосилові установки поділяються на три основні групи:

- двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) у яких процес підведення теплоти (спалювання палива) і процес перетворення її в роботу відбуваються усередині циліндра двигуна;

- газотурбінні установки (ГТУ) і реактивні двигуни, у яких процес спалювання палива також є складовою частиною робочого процесу;

- паросилові установки, де повідомлення теплоти робочому тілу відбувається у окремому агрегаті – паровому котлі (парогенераторі), а перетворення теплоти у роботу – у паровій турбіні.

Загальним для циклів теплових двигунів перших двох груп є використання у якості робочого тіла газоподібних продуктів згоряння палива, які протягом усього циклу перебувають у тому самому агрегатному стані, і при відносно високих температурах їх можна вважати ідеальним газом.

Характерною рисою третьої групи теплосилових установок є використання таких робочих тіл, які у циклі мають агрегатні зміни – рідина, насичена пара, перегріта пара, і підкоряються законам реального газу.

У реальних теплових двигунах перетворення теплоти у роботу пов'язане із протіканням складних необоротних процесів, врахування яких робить термодинамічний аналіз циклів неможливим. У зв'язку із цим для виявлення основних факторів, що впливають на ефективність роботи установок, дійсні процеси заміняють оборотними термодинамічними процесами, що допускають застосування для їх аналізу термодинамічних методів. Такі цикли називають теоретичними.

Двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) називаються теплові двигуни поршневого типу, у яких згоряння палива (підведення теплоти) і перетворення теплоти продуктів згоряння у роботу відбувається безпосередньо усередині робочого циліндра. ДВЗ встановлюють на автомобілях усіх типів, тракторах, танках, мотоциклах, морських і річкових судах, невеликих літаках, пересувних електростанціях і невеликих стаціонарних електростанціях. ДВЗ класифікують за наступними ознаками:

1) за числом ходів (тактів), за яке відбувається один робочий цикл (чотирихтактні та двотактні);

2) за місцем і способом сумішоутворення (із зовнішнім сумішоутворенням, карбюраторні, і із внутрішнім – дизельні);

3) за способом запалення палива (із примусовим запаленням, іскрові-карбюраторні, і із самозапалюванням, дизельні);

4) за видом пального. З рідким паливом: легким – бензинові карбюраторні, важким – дизельні; з газоподібним паливом – газові;

5) за числом і розташуванням циліндрів поділяються на одно-, двох- і багатциліндрові; однорядні, дворядні, V- і W-подібні, опозитні.

Практично найбільш зручно підводити теплоту за ізохорою або за ізобарою або за змішаним способом – ізохорою та ізобарою. Відповідно до цього для ДВЗ розроблено три теоретичні цикли, що мають практичне значення:

1) цикл із підведенням теплоти за $V = \text{const}$;

2) цикл із підведенням теплоти за $P = \text{const}$;

3) цикл зі змішаним підведенням теплоти за $V = \text{const}$ і $P = \text{const}$.

Цикл ДВЗ з підведенням тепла за постійного об'єму (цикл Отто).

Є прототипом робочого процесу у двигунах із примусовим запалюванням. Відмінною рисою таких двигунів є стискання горючої суміші (суміші пари бензину з повітрям). Цей цикл складається із двох адіабат і двох ізохор (рис. 8.4). Адіабата 1–2 відповідає стисканню горючої суміші, ізохора 2–3 – згорянню суміші (підведення теплоти q_1), внаслідок чого тиск підвищується до p_3 . Після цього продукти згоряння адіабатно розширюються (процес 3–4). У ізохорному процесі 4–1 від газу виділяється теплота q_2 .

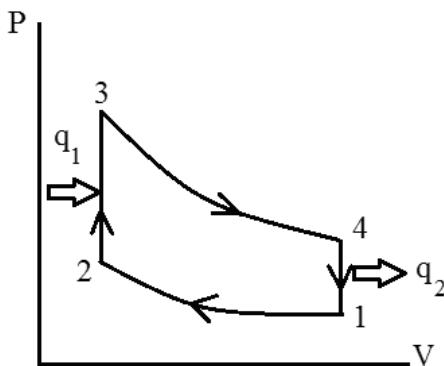


Рисунок 8.4. – Цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти

На рис. 8.4 зображений цикл двотактного ДВЗ. Між точками 4–1 практично за постійного об'єму здійснюється спочатку випуск відпрацьованих газів, а потім і продування циліндра сумішшю палива з повітрям (карбюраторні ДВЗ) або повітрям (дизельні ДВЗ).

Характеристиками цього циклу є:

– ступінь стискання $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$;

– ступінь підвищення тиску $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$.

У цих рівняннях V_1 , V_2 , P_2 , P_3 – об'єми і тиски робочого тіла у відповідних точках циклу ДВЗ.

Розрахунки циклу зводяться до визначення параметрів P , V і T у характерних точках і визначення кількостей підведеного і відведеного тепла, корисної роботи і термічного ККД циклу.

Можна показати, що термічний ККД циклу визначається наступним чином:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \quad (8.3)$$

де k – показник адіабати робочого тіла.

Тобто η_t росте зі збільшенням ступеня стискання. Однак підвищення ступеня стискання не повинне викликати детонацію і samozapalювання горючої суміші у процесі стискання. Залежно від виду палива $\epsilon = 6 \div 10$.

Цикл ДВЗ з підведенням тепла під постійним тиском (цикл Дизеля).

Складається із двох адіабат, ізобари та ізохори (рис. 8.5) і є зразком для двигунів важкого палива, які називаються компресорними дизелями і у яких пальне розпорошується повітрям, що подається у циліндр спеціальним компресором. Через більші габарити і вагу компресорні дизелі застосовуються тільки на судах і у якості стаціонарних установок електростанцій.

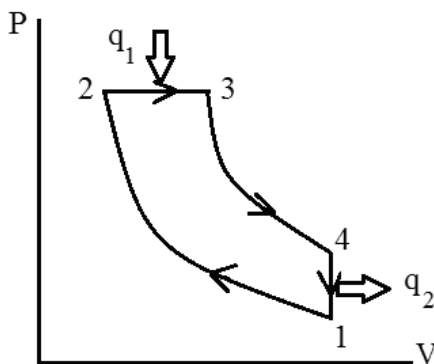


Рисунок 8.5. – Цикл ДВЗ з ізобарним підведенням теплоти

У цих двигунах спочатку стискається за адіабатою 1–2 чисте повітря, у результаті чого його температура підвищується до необхідної температури samozapalювання палива. Потім у ізобарному процесі 2–3 відбувається

упорскування і горіння палива (підведення теплоти q_1). Далі відбувається адіабатне розширення 3–4 та ізохорний вихлоп 4–1 (відведення теплоти q_2).

Характеристиками цього циклу є:

– ступінь стискання $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$;

– ступінь попереднього розширення $\rho = \frac{V_3}{V_2}$.

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{k \cdot (\rho - 1) \varepsilon^{k-1}}. \quad (8.4)$$

Ступінь стискання у дизелях визначається досяжною міцністю і становить $14 \div 16$.

Якщо порівнювати цикл Отто із циклом Дизеля, то виявиться, що термічний ККД циклу Отто вище, ніж циклу Дизеля за однакових ступенів стискання і кількостей підведеного тепла. Але якщо ці цикли порівнювати за однакових максимальних тисках і температурах, то термічний ККД циклу Дизеля виявиться вище термічного ККД циклу Отто.

Звичайно ε і ρ у дизелів вище, ніж у карбюраторних ДВЗ. Тому питома витрата палива (г/кВт) у дизелів менше, ніж у карбюраторних ДВЗ.

Цикл ДВЗ зі змішаним підведенням тепла (цикл Трінклера).

Характерний для так званих безкомпресорних двигунів важкого палива з механічним розпиленням палива. Тут пальне впорскується у циліндр через розпилюючі обладнання (форсунку) за допомогою плунжерного насоса під тиском у кілька сотень бар. Уперше безкомпресорний нафтовий двигун був створений у 1904 р. конструктором Сормовського заводу Г.В. Трінклером (згодом професор Горьківського політехнічного інституту). Спалювання палива у такому двигуні спочатку відбувається за лінією $V = \text{const}$ (процес 2–3) з підвищенням тиску (рис. 8.6), а потім під постійним тиском (процес 3–4).

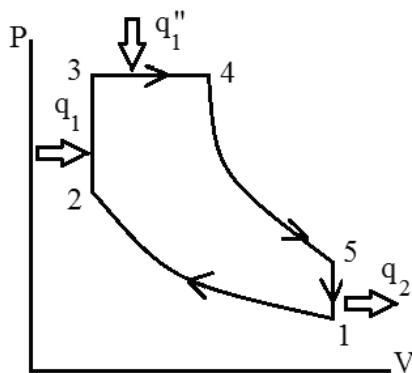


Рисунок 8.6. – Цикл ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти

Характеристиками цього циклу є:

– ступінь стискання $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$;

– ступінь підвищення тиску $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$;

– ступінь попереднього розширення $\rho = \frac{V_4}{V_3}$.

Термічний ККД циклу наступний:

$$\eta_t = \frac{q_1' + q_1'' - q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)} \quad (8.5)$$

Термічний ККД циклу зростає зі збільшенням ступеня стискання і ступеня підвищення тиску та зменшується зі збільшенням ступеня попереднього розширення. Тому сучасні дизелі прагнуть конструювати так, щоб у теоретичному циклі ізобарна ділянка тепла мала мінімальні розміри, тобто так, щоб $\rho \approx 1$.

За $\rho = 1$ цикл Трінклера перетворюється у цикл Отто, а за $\lambda = 1$ – у цикл Дизеля. Цикл Трінклера є найбільш ефективним, тому сучасні дизелі працюють за циклом Трінклера. Термічний ККД різних двигунів внутрішнього згоряння становить у середньому $0,45 \div 0,6$.

Цикли ГТУ з ізобарним і ізохорним підведенням теплоти.

У якості найпростіших циклів газотурбінних установок (ГТУ) прийняті: цикл з ізобарним підведенням теплоти і цикл з ізохорним підведенням теплоти.

Ці цикли відрізняються від відповідних циклів ДВЗ процесом відведення теплоти – ізохорний процес відведення замінений ізобарним. Сучасні ГТУ у основному працюють з ізобарним підведенням теплоти.

Теоретичний цикл ГТУ з ізобарним підведенням теплоти (рис. 8.7) складається з процесу адіабатного стискання повітря 1–2 у компресорі, процесу ізобарного підведення теплоти 2–3 у камері згоряння і процесу адіабатного розширення 3–4 продуктів згоряння у соплах газової турбіни. Після перетворення кінетичної енергії потоку газу на робочих лопатках і процесу відведення теплоти 4–1 від газу у навколишнє середовище під постійним тиском P_1 цикл завершується.

Корисна робота у циклі дорівнює різниці між технічною роботою турбіни і технічною роботою, витраченою на привод компресора.

Цикл газової турбіни з ізобарним підведенням теплоти характеризується

ступенем підвищення тиску у циклі: $\beta = \frac{P_2}{P_1}$.

Термічний ККД циклу визначають:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \quad (8.6)$$

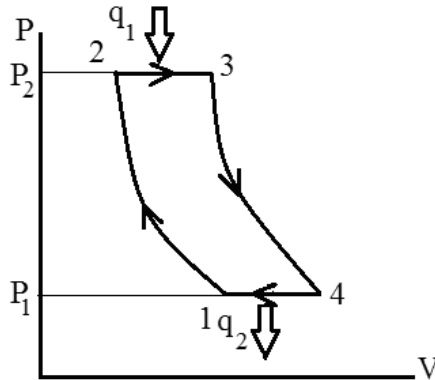


Рисунок 8.7. – Цикл ГТУ з ізобарним підведенням теплоти

Теоретичний цикл ГТУ з ізохорним підведенням теплоти (рис. 8.8) складається із процесу адіабатного стискання повітря 1–2 у компресорі, процесу ізохорного підведення теплоти 2–3 у камері згоряння і процесу адіабатного розширення 3–4 продуктів згоряння у соплах газової турбіни. Після перетворення кінетичної енергії потоку газу на робочих лопатках і процесу відведення теплоти 4–1 від газу у навколишнє середовище під постійним тиском P_1 цикл завершується.

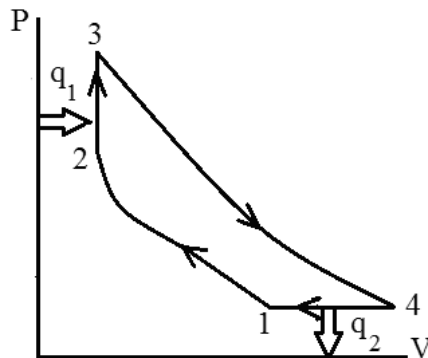


Рисунок 8.8. – Цикл ГТУ з ізохорним підведенням теплоти

Цикл газової турбіни з ізохорним підведенням теплоти характеризується:

– ступенем підвищення тиску за стискання $\beta = \frac{P_2}{P_1}$;

– ступенем підвищення тиску за підведення теплоти $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$.

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = 1 - k \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{(\lambda - 1) \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (8.7)$$

Цикл ГТУ з підведенням теплоти за $V = \text{const}$ не одержав широкого поширення через складність конструкції камери згоряння і погіршення умов роботи турбіни у пульсуючому потоці продуктів згоряння.

8.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Розрахувати термічний ККД газотурбінної установки з ізобарним підведенням теплоти за наступними параметрами: $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_2 = 900 \text{ K}$, $T_3 = 1800 \text{ K}$, $T_4 = 600 \text{ K}$, $c_p = 1,008 \text{ кДж/(кг·K)}$, $c_v = 0,721 \text{ кДж/(кг·K)}$.

Розв'язання.

Знаходимо кількість підведеної теплоти:

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = 1,008(1800 - 900) = 907 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Кількість відведеної теплоти:

$$q_2 = c_v (T_1 - T_4) = 0,721(300 - 600) = -216 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Визначаємо корисно використане тепло:

$$q_{\text{ц}} = q_1 - q_2 = 907 - (-216) = 691 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{216}{907} = 0,76.$$

Відповідь. Термічний ККД циклу дорівнює 0,76.

Приклад 2. Визначити параметри у вузлових точках циклу двигуна внутрішнього згоряння з підведенням теплоти за $v = \text{const}$, а також термічний ККД циклу. Параметри початкової точки циклу $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 127^\circ\text{C}$; ступінь стискання $\varepsilon = 6$; ступінь підвищення тиску $\lambda = 3,5$. Робоче тіло – повітря, для якого питома газова постійна $R = 287 \text{ Дж/(кг·K)}$, показник адиабати $k = 1,41$.

Розв'язання.

Знаходимо початковий питомий об'єм повітря:

$$v_1 = RT_1/P_1 = 287 \cdot 400/10^5 = 1,15 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо параметри повітря наприкінці процесу стискання:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,15}{6} = 0,19 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_2 = P_1 \varepsilon^k = 0,1 \cdot 6^{1,41} = 1,25 \text{ МПа};$$

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} = 400 \cdot 6^{0,41} = 818 \text{ К}.$$

Параметри повітря наприкінці процесу згоряння:

$$v_3 = v_2 = 0,19 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_3 = P_2 \lambda = 1,25 \cdot 3,5 = 4,37 \text{ МПа};$$

$$T_3 = T_2 \lambda = 818 \cdot 3,5 = 2863 \text{ К}.$$

Параметри повітря наприкінці адіабатного розширення:

$$v_4 = v_1 = 1,15 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_4 = \frac{RT_4}{v_4} = 287 \cdot \frac{1400}{1,15 \cdot 10} = 0,35 \text{ МПа};$$

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k-1}} = \frac{2863}{6^{1,41-1}} = 1400 \text{ К}.$$

Питома теплота, що підводиться до повітря становить:

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) = \mu c_v \frac{(T_3 - T_2)}{\mu c_{v0}} = 20,9 \frac{2863 - 818}{29} = 1431,5 \text{ кДж/кг}.$$

Питома кількість відведеної теплоти:

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1) = 20,9 \frac{1400 - 400}{29} = 731,5 \text{ кДж/кг}.$$

Питома теплота, яка корисно використовується:

$$q_0 = q_1 - q_2 = 1431,5 - 700 = 731,5 \text{ кДж/кг}.$$

Термічний ККД циклу становить:

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_1} = \frac{731,5}{1431,5} = 0,513.$$

Відповідь. Термічний ККД циклу дорівнює 0,513.

Приклад 3. Визначити термічний ККД основного циклу паросилової установки (циклу Ренкіна), а також питому і годинну витрату пари, якщо парова турбіна потужністю $N = 50$ тис. кВт працює за наступних початкових параметрів пари: $P_1 = 9$ МПа, $t = 500^\circ\text{C}$, а тиск у конденсаторі $p_2 = 0,004$ МПа.

Розв'язання.

За h_s -діаграмою при початкових параметрах пари P_1 і t_1 питома ентальпія дорівнює $h_0 = 3386$ кДж/кг.

Наприкінці адіабатного розширення до тиску p_2 питома ентальпія дорівнює $h_2 = 2006$ кДж/кг.

За таблицями додатку при $P_2 = 0,004$ МПа знаходимо $h_2' = 121,42$ кДж/кг.

Термічний ККД циклу складає:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2} = \frac{3386 - 2006}{3386 - 121,42} = 0,423.$$

Питома витрата пари:

$$d_0 = \frac{3600}{h_1 - h_2} = \frac{3600}{3386 - 2006} = 2,61 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{год}).$$

Годинна витрата пари:

$$D_0 = d_0 N = 2,61 \cdot 50 \cdot 10^3 = 130,5 \text{ т/год}.$$

Відповідь. Термічний ККД циклу дорівнює 0,423. Питома витрата пари дорівнює 2,61 кг/(кВтгод). Годинна витрата пари складає 130,5 т/год.

8.2. Питання для самоконтролю

1. З яких процесів складається цикл швидкого горіння – цикл Отто?
2. У якому циклі ДВЗ допускається більш високий ступінь стискання?
3. Що називається ступенем попереднього розширення у циклі з комбінованим підведенням тепла?
4. Чому рівна сума наведених теплот у оборотному циклі Карно?
5. На якому з рисунків зображений прямий цикл Карно?
6. На якому з рисунків зображений цикл з ізобарним підведенням тепла?
7. Що називається наведеним теплом?
8. На якому з рисунків зображений ДВЗ з ізохорним підведенням тепла?
9. З яких процесів складається цикл зі змішаним підведенням тепла?
10. Що називається ступенем підвищення тиску?
11. З яких процесів складається прямий цикл Карно?
12. На якому з рисунків зображений цикл зі змішаним підведенням тепла?
13. За якою формулою визначається термічний ККД циклу?
14. Що називається ступенем стискання ϵ циклу?
15. При якому значенні q_2 досягається максимальний термічний ККД?
16. Який цикл називається прямим?
17. Що називається ступенем попереднього розширення ρ у циклі повільного горіння (цикл Дизеля)?
18. Що називається циклом?
19. Як залежить термічний ККД η_t ДВЗ від ступеню стискання ϵ ?
20. Як змінюється термічний ККД у циклі ДВЗ з комбінованим підведенням тепла зі збільшенням ступеня підвищення тиску λ ?
21. Від чого залежить ККД машини при роботі за оборотним циклом Карно?

8.3. Тестові питання

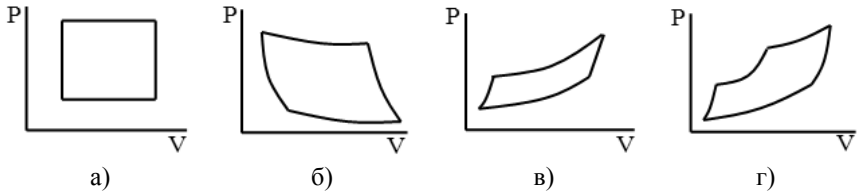
1. За зворотним циклом Карно працюють:

- а) теплові двигуни;
- б) парові турбіни;
- в) двигуни внутрішнього згоряння;
- г) холодильні установки.

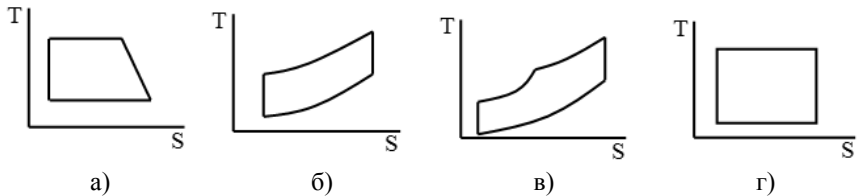
2. За прямим циклом Карно працюють:

- а) теплові двигуни;
- б) теплові насоси;
- в) парові турбіни;
- г) холодильні установки.

3. Цикл Карно у координатних осях P–V показаний на діаграмі:



4. Цикл Карно у координатних осях T–S показаний на діаграмі:



5. Рівняння для розрахунків термічного ККД прямого циклу Карно має вигляд:

а) $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot p^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (p - 1)}$;

б) $\eta_t = 1 - \frac{p^k - 1}{k \cdot (p - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$;

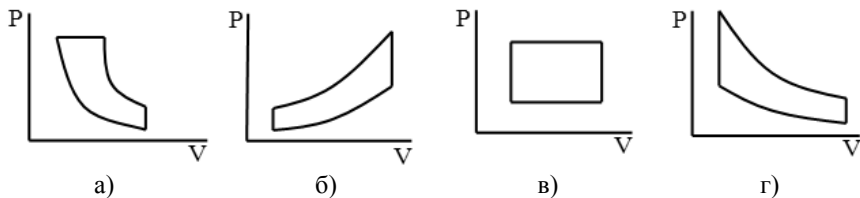
в) $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$;

г) $\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$.

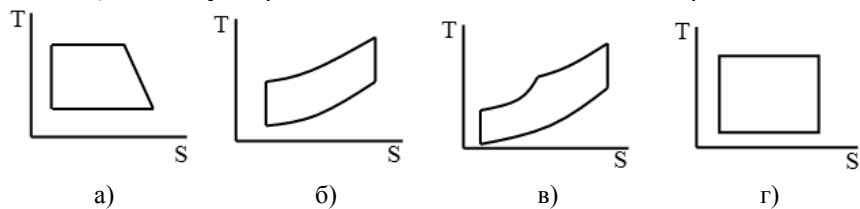
6. За циклом Отто працюють:

- а) дизельні двигуни;
- б) карбюраторні двигуни;
- в) парові турбіни;
- г) теплові насоси.

7. Цикл Отто у координатних осях P–V показаний на діаграмі:



8. Цикл Отто у координатних осях T–S показаний на діаграмі:



9. Рівняння для розрахунків термічного ККД двигуна внутрішнього згоряння з підведенням теплоти ($V = \text{const}$) виглядає як:

а) $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}$;

б) $\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$;

в) $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$;

г) $\eta_t = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_K}$.

10. Рівняння для розрахунків підведеної теплоти у циклі ДВЗ за $V = \text{const}$ має вигляд:

а) $q_1 = q'_1 + q''_1$;

б) $q_1 = 0$;

в) $q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2)$;

г) $q_1 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$.

11. Рівняння для розрахунків теплоти, що виділяється, у циклі ДВЗ за $V = \text{const}$ має вигляд:

а) $q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1)$;

б) $q_2 = m \cdot c_v \cdot (T_5 - T_1)$;

в) $q_2 = 0$;

г) $q_2 = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)$.

12. Ступінь стискання ДВЗ визначається виразом:

а) $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$;

б) $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$;

в) $\rho = \frac{v_4}{v_3}$;

г) $\varepsilon = \frac{C}{C_0}$.

13. Ступінь підвищення тиску у циклі ДВЗ визначається як:

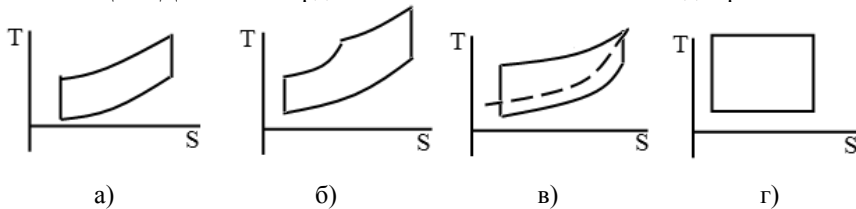
а) $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$;

б) $\rho = \frac{v_4}{v_3}$;

в) $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$;

г) $\rho = \frac{T_4}{T_3}$.

14. Цикл Дизеля в координатних осях $T-S$ показаний на діаграмі:



15. Рівняння для розрахунків підведеної теплоти під постійним тиском у циклі ДВЗ має вигляд:

$$\text{a) } q_1 = c_p \cdot (T_3 - T_2);$$

$$\text{б) } q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2);$$

$$\text{в) } q_1 = R \cdot T \cdot \ln \frac{P_1}{P_2};$$

$$\text{г) } q_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1).$$

16. Рівняння для розрахунків теплоти, що виділяється, для циклу Дизеля має вигляд:

$$\text{a) } q_2 = c_v \cdot (T_5 - T_1);$$

$$\text{б) } q_1 = c_v \cdot (T_4 - T_1);$$

$$\text{в) } q_0 = P \cdot (v'' - v');$$

$$\text{г) } q_{\text{не}} = h_{\text{не}} - h''.$$

17. Ступінь попереднього розширення у циклі ДВЗ визначається за формулою:

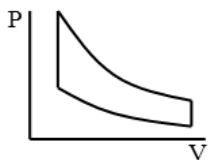
$$\text{a) } \varepsilon = \frac{v_1}{v_2};$$

$$\text{б) } \lambda = \frac{P_3}{P_2};$$

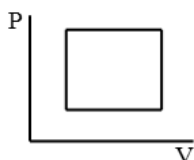
$$\text{в) } \rho = \frac{T_3}{T_2};$$

$$\text{г) } C = C_0 \cdot \varepsilon.$$

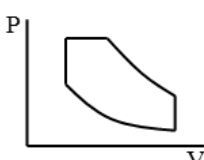
18. Цикл Дизеля у координатних осях P–V представлений на діаграмі:



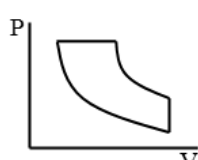
а)



б)



в)

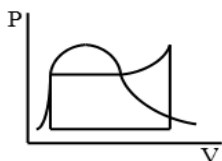


г)

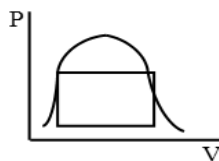
19. Цикл Ренкіна у координатних осях P–V показаний на діаграмі:



а)



б)



в)

20. Рівняння для розрахунків ККД циклу Ренкіна представлене виразом:

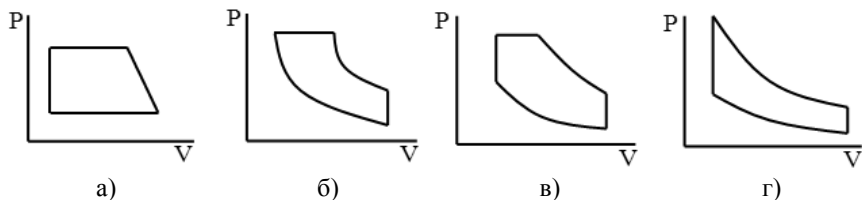
$$\text{а) } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)};$$

$$\text{б) } \eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

$$\text{в) } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

$$\text{г) } \eta_t = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_K}.$$

21. Цикл Трінклера у координатних осях P–V показаний на діаграмі:



22. Рівняння для розрахунків термічного ККД двигуна внутрішнього згоряння зі змішаним підведенням теплоти ($P = \text{const}$ і $V = \text{const}$) має вигляд:

$$\text{а) } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)};$$

$$\text{б) } \eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

$$\text{в) } \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

$$\text{г) } \eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

23. Теплота, що підводиться у циклі зі змішаним підведенням теплоти визначається за формулою:

$$\text{а) } q_1 = c_p \cdot (T_3 - T_2);$$

$$\text{б) } q_1 = q'_1 + q''_1;$$

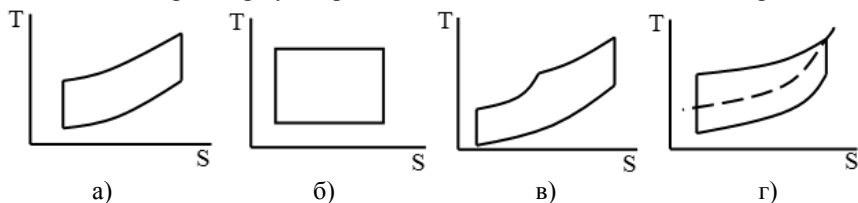
$$\text{в) } q_1 = R \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$\text{г) } q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2).$$

24. Теплота, що виділяється, у циклі ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти визначається за формулою:

- 1) $q_2 = c_v \cdot (T_5 - T_1)$;
- 2) $q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1)$;
- 3) $q_2 = 0$;
- 4) $q_2 = \ell$.

25. Цикл Трінклера у координатних осях T–S показаний на діаграмі:



26. Порівнювати цикли ДВЗ необхідно:

- а) за найбільшими площами діаграм;
- б) за найбільшими тисками;
- в) за найменшими площами діаграм;
- г) за найменшими температурами.

27. Найбільший термічний ККД буде у циклі:

- а) з ізобарним підведенням теплоти;
- б) Карно;
- в) з ізохорним підведенням теплоти;
- г) зі змішаним підведенням теплоти.

28. Процес одержання водяної пари за рахунок молекул, що виділяються з поверхні води, називається:

- а) кипінням;
- б) випаровуванням;
- в) конденсацією;
- г) дистиляцією.

29. Рівняння Руша має вигляд:

- а) $t_k = 100 \cdot \sqrt[4]{P}$;
- б) $R_e = \frac{\omega \cdot d}{v}$;
- в) $\varphi_0 = \tau_0 \cdot T^4$;
- г) $q = \alpha \cdot (t_{ст} - t_{ж})$.

8.4. Задачі

Задача 1. Для ідеального циклу ГТУ з ізобарним підведенням теплоти визначити параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках, кількість теплоти, що виділяється, роботу циклу і термічний ККД, якщо початкові параметри робочого тіла: $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 22^\circ\text{C}$, ступінь підвищення тиску у компресорі $\beta = 6$, кількість підведеної теплоти $q_1 = 210$ кДж/кг.

Задача 2. Визначити, як зміняться термічний ККД теоретичного циклу ГТУ і робота адіабатного розширення, якщо перегріта пара має наступні початкові параметри: $P_1 = 8,0$ МПа і $t_1 = 510^\circ\text{C}$, перед потраплянням на турбіну дрослюється до тиску $P'_1 = 5,0$ МПа. Тиск пари наприкінці розширення $P_2 = 0,005$ МПа.

Задача 3. Визначити параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках циклу Карно, роботу і термічний ККД циклу, якщо $P_{\text{хв}} = 0,1$ МПа, $K_{\text{хв}} = 300$ К, $P_{\text{хв}} = 25$ МПа, $T_{\text{хв}} = 1800$ К.

Задача 4. Визначити, при якому ступені підвищення тиску у компресорі робота ідеального циклу ГТУ з ізобарним підведенням теплоти буде максимальною, якщо початкові параметри робочого тіла (повітря) наступні: $P_1 = 0,1$ МПа, $T_1 = 300$ К, максимальна температура у циклі $T_3 = 1000$ К.

Задача 5. Визначити термічний ККД теоретичного циклу і годинну витрату пари на турбогенераторі потужністю $N = 750$ кВт, якщо початкові параметри пари $P_1 = 3,9$ МПа, $t_1 = 465^\circ\text{C}$, тиск відпрацьованої пари $P_2 = 0,005$ МПа.

Задача 6. Для ідеального циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти визначити параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках, ступінь підвищення тиску λ , ступінь попереднього розширення ρ , кількість підведеної теплоти, що виділяється, роботу циклу і термічний ККД, якщо початкові параметри робочого тіла наступні: $P_1 = 0,14$ МПа, $t_1 = 35^\circ\text{C}$, ступінь стискування $\varepsilon = 14$, максимальні параметри циклу $P_3 = 6,5$ МПа, $t_3 = 1600^\circ\text{C}$.

Задача 7. Визначити термічний ККД і питому витрату пари у теоретичному циклі ГТУ, якщо початкові параметри пари наступні: $P_1 = 3,2$ МПа, $t_1 = 390^\circ\text{C}$, тиск у конденсаторі $P_2 = 0,005$ МПа. Як зміняться термічний ККД, питома витрата пари і ступінь сухості наприкінці розширення у випадках, якщо:

- тиск у конденсаторі стане рівним $0,01$ МПа;
- тиск перегрітої пари стане рівним $4,0$ МПа;
- температура перегрітої пари стане рівною 470°C .

Задача 8. Продукти згоряння палива ДВЗ з параметрами $P_1 = 0,4$ МПа і $T_1 = 600$ К адіабатно розширюються у газовій турбіні турбонагнітача до атмосферного тиску. У ізобарному процесі випускання від продуктів згоряння виділяється 210 кДж/кг теплоти. Визначити роботу розширення і кінцеві параметри продуктів згоряння.

Задача 9. Визначити термічний ККД ідеального циклу ГТУ із двоступінчастим стисканням і двоступінчастим ізобарним підведенням теплоти, якщо початкові параметри робочого тіла (повітря) $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, температура робочого тіла після охолодження у повітроохолоджувачі рівна 47°C , максимальна температура робочого тіла після підведення теплоти у кожній камері згоряння дорівнює 727°C , ступінь підвищення тиску на кожній ступені компресора $\beta_k = 2,5$, ступінь зниження тиску на кожній ступені турбіни $\beta_t = 2,5$.

Задача 10. Повітря, початкові параметри якого $P_1 = 0,1$ МПа і $T_1 = 300$ К, адіабатно стискається у компресорі турбонагнітача ДВЗ до тиску $P_2 = 0,28$ МПа. Потім повітря надходить у холодильник, де під постійним тиском його температура знижується до 37°C . Визначити роботу стискання у компресорі і кількість теплоти, що виділяється від 1 кг повітря.

Задача 11. Розрахувати цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти (цикл Отто), якщо початкові параметри робочого тіла: $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, ступінь стискання $\epsilon = 6,5$, а відведена кількість теплоти $q_2 = 320$ кДж/кг. Визначити параметри у характерних точках циклу, підведену кількість теплоти, роботу і термічний ККД циклу, а також термічний ККД циклу Карно у тому ж інтервалі температур. Зобразити цикл у координатах P – V і T – S . Робоче тіло – повітря.

Задача 12. Тепловий двигун працює за циклом ДВЗ із підведенням тепла при постійному об'ємі. При цьому параметри робочого тіла послідовно змінюються у чотирьох процесах: 1–2 – адіабатне стискання; 2–3 – ізохорне підведення тепла; 3–4 – адіабатне розширення; 4–1 – ізохорне охолодження. Робоче тіло – повітря. Початкові параметри робочого тіла відповідають нормальним технічним умовам. Ступінь стискання $\epsilon = 5$, кількість тепла підведена до робочого тіла $q = 950$ кДж/кг. Приймаючи за робоче тіло газ незмінної сполуки, розрахувати параметри робочого тіла у контрольних точках процесу; ККД двигуна; співвідношення роботи розширення і роботи стискання. Зобразити цикл на PV – і TS –діаграмах.

Задача 13. Газ, що виконує цикл Карно, одержує від нагрівача теплоту $Q_1 = 42$ кДж. Яку роботу чинить газ, якщо абсолютна температура нагрівача у три рази вище, ніж температура охолоджувача?

Задача 14. Для циклу поршневого двигуна внутрішнього згоряння з підведенням теплоти за $v = \text{const}$ визначити параметри характерних для циклу точок, кількості підведеної і відведеної теплоти, термічний ККД циклу і його корисну роботу (кДж). Дано: $P_1 = 0,15$ МПа; $t_1 = 120^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 7$; $\lambda = 1,2$; $k = 1,4$. Робоче тіло – повітря. Теплоємність вважати постійною. Побудувати цикл у координатах P – V .

Задача 15. Ступінь підвищення тиску у компресорі газотурбінної установки (ГТУ) дорівнює $\lambda = 7$ температура робочого тіла (для $k = C_p/C_v = 1,4$ – повітря) перед соплами турбіни рівна 800°C . У ідеальному циклі ГТУ теплота підводиться під постійним тиском. Визначити основні параметри робочого тіла у перехідних точках циклу, термічний ККД, питому корисну роботу циклу, а також зміну питомої ентропії у процесі підведення теплоти, прийнявши теплоємність робочого тіла не залежну від температури. Початкові параметри циклу $P_1 = 0,1$ МПа і $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Цикл представити на PV – і TS –діаграмах.

Задача 16. Побудувати PV – і TS –діаграми циклу двигуна внутрішнього згоряння з підведенням теплоти за постійного об'єму. За допомогою діаграм розрахувати цикл ДВЗ за даними: тиск $P_1 = 0,2$ МПа; початкова температура $t_1 = 28^\circ\text{C}$; ступінь стискання $\varepsilon = 5$; ступінь підвищення тиску $\lambda = 1,2$; газова постійна $R = 188,9$ кДж/кг·К; коефіцієнт адіабати $k = 1,29$; теплоємність газу вважати постійною, кількість газу – 1 кг.

Задача 17. Повітря, початкові параметри якого $P_1 = 0,17$ МПа і $T_1 = 300$ К, адіабатно стискається у циліндрі ДВЗ. Ступінь стискання $\varepsilon = 10$. Потім у ізохорному процесі до нього підводять 288 кДж/кг теплоти. Визначити роботу стискання і параметри повітря після підведення теплоти.

Задача 18. Для ідеального циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти, визначити параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках, ступінь підвищення тиску λ , ступінь попереднього розширення ρ , кількість підведеної та відведеної теплоти, роботу і термічний ККД циклу, якщо початкові параметри робочого тіла наступні: $P_1 = 0,12$ МПа, $t_1 = 37^\circ\text{C}$, ступінь стискання $\varepsilon = 12$, максимальна температура циклу $t_4 = 1700^\circ\text{C}$, температура після адіабатного розширення $t_5 = 600^\circ\text{C}$.

Задача 19. Визначити термічний ККД і питому витрату пари, у теоретичному циклі ГТУ з повторним перегрівом пари, якщо початкові параметри пари: $P_1 = 8,0$ МПа, $t_1 = 510^\circ\text{C}$, тиск у конденсаторі $P_2 = 0,005$ МПа. Пара після розширення, на першій ступені турбіни, до тиску 0,7 МПа знову перегрівается до початкової температури. Якими були б термічний ККД і ступінь сухості пари наприкінці розширення у циклі з однократним перегрівом?

Задача 20. Повітря, початкові параметри якого $P_1 = 0,1$ МПа і $T_1 = 295$ К, адіабатно стискається у компресорі ГТУ і подається у камеру згорання, де до нього під постійним тиском підводять 240 кДж/кг теплоти. Визначити роботу стискання у компресорі та параметри повітря після підведення теплоти, якщо ступінь підвищення тиску у компресорі $\beta = 4$.

Задача 21. Для ідеального циклу ГТУ з ізобарним підведенням теплоти визначити параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках, кількість підведеної та відведеної теплоти, роботу і термічний ККД циклу, якщо початкові параметри робочого тіла: $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, ступінь підвищення тиску у компресорі $\beta = 5$, максимальна температура у циклі $t_3 = 700^\circ\text{C}$.

Задача 22. Визначити термічний ККД теоретичного циклу і годинну витрату пари на турбогенератор потужністю 300 кВт, якщо початкові параметри пари: $P_1 = 3,2$ МПа, $t_1 = 395^\circ\text{C}$, тиск відпрацьованої пари $P_2 = 0,01$ МПа.

Задача 23. Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна. При вході у турбіну пар має тиск $P_1 = 5,2$ МПа і температуру $t_1 = 500^\circ\text{C}$; тиск у конденсаторі $P_2 = 0,0035$ МПа. Визначити термічний ККД і питому витрату пари.

Задача 24. Для ідеального циклу поршневого ДВЗ із комбінованим підведенням теплоти визначити параметри робочого тіла у вузлових точках, термічний ККД, кількість підведеної та відведеної теплоти, корисну роботу і ступінь заповнення циклу, якщо початкові параметри робочого циклу: $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 25^\circ\text{C}$, ступінь адіабатного стискання $\varepsilon = 6$, ступінь підвищення тиску за ізохорою $\lambda = 2,9$, ступінь попереднього розширення $\rho = 1,5$. Робоче тіло – повітря ($k = 1,4$). Визначити також зміну термічного ККД циклу при збільшенні ступеня стискання ε на 1 .

Задача 25. Для теоретичного циклу ГТУ з підведенням теплоти під постійним тиском визначити параметри робочого тіла (повітря) у характерних точках циклу, підведену і відведену теплоту, роботу і термічний ККД циклу, якщо початковий тиск дорівнює $P_1 = 0,1$ МПа, початкова температура становить $t_1 = 27^\circ\text{C}$, ступінь підвищення тиску у компресорі складає $\pi = P_2/P_1 = 8$, температура газу перед турбіною $t_3 = 750^\circ\text{C}$. Визначити теоретичну потужність ГТУ при заданій витраті повітря $G = 70$ кг/с. Надати схему і зобразити у масштабі цикл установки на PV - і TS -діаграмах. Теплоємність повітря прийняти не залежною від температури.

Задача 26. Порівняти термічний ККД двох паросилових установок, що працюють за допомогою пари з параметрами: $P_1 = 1,5$ МПа і $t_1 = 450^\circ\text{C}$, якщо:

1) у одній з них турбіна працює на вихлоп у атмосферу ($P_2 = 0,1$ МПа) і котел живиться водою із зовнішнього джерела з температурою $t_b = 30^\circ\text{C}$;

2) у другому випадку пара після турбіни іде у конденсатор з абсолютним тиском $P_2 = 0,005$ МПа, і котел живиться конденсатом відпрацьованої пари. Побудувати процес на hs -діаграмі.

Задача 27. Зобразіть цикл із проміжним перегрівом пари на TS та hs -діаграмах. Як визначити ККД циклу з проміжним перегрівом?

Задача 28. Газ масою 1 кг у прямому оборотному циклі Карно виконує корисну роботу $l_1 = 20$ кДж/кг. Максимальний абсолютний тиск повітря 10 МПа і відповідна абсолютна температура 1200 K , у циклі до газу підводять теплоту $q_1 = 31$ кДж/кг. Мінімальний тиск у циклі $0,1$ МПа. Визначити термічний ККД і основні параметри у всіх перехідних точках циклу. Зобразіть цикл на PV - і TS -діаграмах. Газову постійну прийняти рівною $R = 28\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$.

9. ЦИКЛИ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК І ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Охолодження тіл до температури, що є нижчою температури навколишнього середовища, здійснюється за допомогою холодильних установок, що працюють за зворотнім тепловим циклом (цикл, у якому робота стисання перевищує роботу розширення і за рахунок підведеної роботи тепло передається від нижнього джерела тепла до верхнього).

Холодильна установка містить у собі пристрій для стисання (компресор або насос) і розширення робочого тіла – холодоагенту. Розширення робочого тіла може відбуватися зі здійсненням корисної роботи (у поршневій машині або турбомашині) і без її здійснення. Машини, що застосовуються у холодильних установках для охолодження робочого тіла у процесі його розширення зі здійсненням роботи, називаються детандерами.

Для характеристики ефективності циклу холодильної установки застосовується так званий холодильний коефіцієнт ε :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_{\text{ц}}} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} \quad (9.1)$$

де q_2 – тепло, що відбирається з холодильного джерела, $q_2 = T_{\text{підв}}^{\text{сер}} \Delta S$;

q_1 – тепло, що віддається гарячому джерелу, $q_1 = T_{\text{відв}}^{\text{сер}} \Delta S$;

$T_{\text{підв}}^{\text{сер}}$, $T_{\text{відв}}^{\text{сер}}$ – середня температура відведення і підведення тепла;

ΔS – зміна ентропії між крайніми точками циклу.

У такий спосіб рівняння (9.1) може бути надане у вигляді:

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{підв}}^{\text{сер}}}{T_{\text{відв}}^{\text{сер}} - T_{\text{підв}}^{\text{сер}}} \quad (9.2)$$

Чим вище значення холодильного коефіцієнта, тим більше ефективний цикл: чим він вище, тим меншу роботу $l_{\text{ц}}$ потрібно виконати, щоб відвести від охолоджуваного тіла ту саму кількість тепла q_2 .

Холодильні установки за видом холодоагентів поділяються на дві основні групи:

- 1) газові (зокрема повітряні) холодильні установки;
- 2) парові холодильні установки (холодоагент – пара різних речовин): парокompresійні; пароежекторні; абсорбційні.

Цикл повітряної холодильної установки.

Повітряна холодильна установка була одним з перших типів холодильних установок, застосованих на практиці.

Холодоагент (повітря) розширяється у детандері 1 від тиску p_1 до тиску p_2 , виконуючи роботу, що віддається детандером зовнішньому споживачеві. Повітря, охолоджене від температури T_1 до T_2 , надходить у охолоджуваний об'єм 2, з якого воно відбирає тепло. Цей процес відбувається під постійним тиском. Потім повітря направляється у компресор 3, де його тиск підвищується від p_2 до p_1 (при цьому температура повітря зростає

від T_3 до T_4). Стиснене компресором повітря надходить у охолоджувач 4. Процес у охолоджувачі відбувається під постійним тиском повітря ($p_1 = \text{const}$).

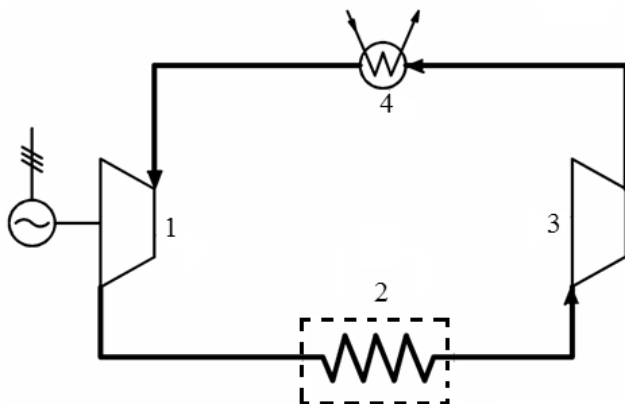


Рисунок 9.1. – Схема повітряної холодильної установки

Цикл повітряної холодильної установки зображений на PV -діаграмі на рис 9.2.

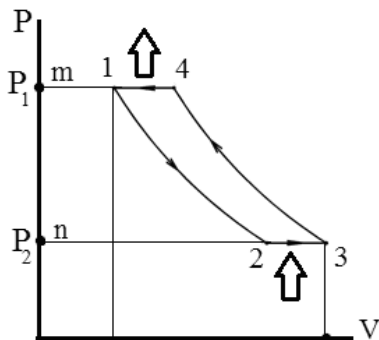


Рисунок 9.2. – Цикл повітряної холодильної установки у PV -координатах

Основні процеси циклу зображені наступними лініями: 1–2 – адіабатний процес розширення повітря у детандері, 2–3 – ізобарний процес відведення тепла з охолоджуваного об'єму, 3–4 – процес стискання у компресорі, 4–1 – ізобарний процес охолодження повітря у охолоджувачі, 3–4–1 – лінія стискання повітря, а 1–2–3 – лінія розширення. Робота, затрачена на привід компресора, зображується площею $m-4-3-n-m$, а робота, вироблена повітрям у детандері – $m-1-2-n-m$. Отже, робота, затрачена у циклі повітряної холодильної установки, $l_{\text{ц}}$, зображується площею 1–2–3–4–1.

Цикл компресійної холодильної установки.

Здійснити у холодильній установці підведення і відведення тепла за ізотермами вдається у тому випадку, якщо у якості холодоагенту використовується волога пара будь-якої легко киплячої рідини (рідина, температура кипіння якої під атмосферним тиском $t_s \leq 0^\circ\text{C}$).

Схема холодильної установки, що здійснює цикл з вологою парою, представлена на рис. 9.3.

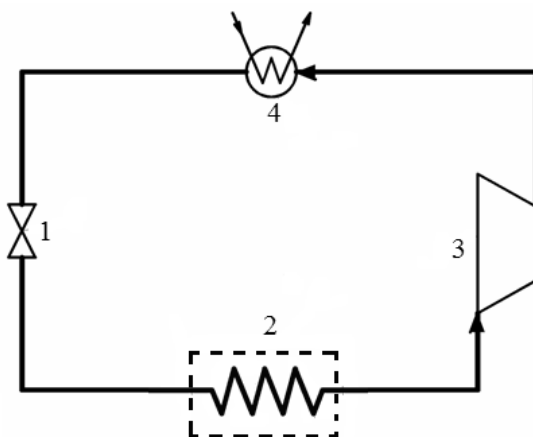


Рисунок 9.3. – Схема компресійної холодильної установки

Стиснена, у компресорі 3 до тиску p_1 , волога пара надходить у охолоджувач (конденсатор) 4, де за рахунок віддачі тепла охолоджуваній воді відбувається конденсація пари. Цей процес відбувається за ізобарою-ізотермою 4–1, так що з конденсатора виходить рідина у стані насичення, який відповідає точці 1 на TS -діаграмі.

У холодильних установках, що використовують у якості холодоагентів вологі пари легко киплячих рідин, як правило, детандери не застосовуються і замість процесу розширення з віддачею зовнішньої роботи використовується процес розширення без віддачі зовнішньої роботи, тобто процес дроселювання. Процес дроселювання вологої пари завжди відбувається зі зниженням температури.

Рідина під тиском P_1 і за температури T_1 (точка 1) направляється у дросельний (редукційний) вентиль 1 (рис. 9.3), де вона дроселюється до тиску P_2 . З редукційного вентиля виходить пара за температури T_2 і з малим ступенем сухості. Необоротний процес дроселювання у редукційному вентилі зображено на рис. 9.4 лінією 1–2 після виходу з редукційного вентиля волога пара направляється у розміщений у охолоджуваному об'ємі випарник 2 (рис. 9.3), де за рахунок тепла, що відбирається від

охладжуваних тіл, рідина, яка міститься у вологій парі, випаровується; ступінь сухості вологій пари при цьому зростає.

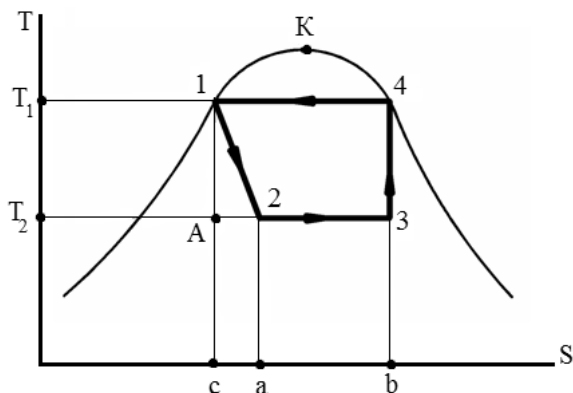


Рисунок 9.4. – Цикл компресійної холодильної установки у TS-координатах

Ізобарно-ізотермічний процес підведення тепла до холодоагенту у випарнику від охолоджуваного об'єму зображений на рис. 9.4 лінією 2–3. Тиск P_2 вибирається таким чином, щоб відповідна до цього тиску температура насичення була трохи нижче температури насичення охолоджуваного об'єму. З випарника пара високого ступеня сухості направляється у компресор, де вона адіабатно стискається від тиску P_2 до тиску P_1 . У процесі адіабатного стискання (лінія 3–4, рис. 9.4) ступінь сухості пари зростає, так що з компресора виходить суха насичена пара. Потім пара направляється у конденсатор 4 і цикл замикається.

Установка такого вигляду називається пароконпресійною, тому що у ній стискання вологій пари відбувається за допомогою компресора. Розглянутий цикл відрізняється від циклу Карно тільки тим, що охолодження холодоагенту від T_1 до T_2 , замість оборотної адіабати розширення у детандері (1–А на рис. 9.4), відбувається за необоротною адіабатою розширення у дросельному вентилі 1–2. Процес дроселювання приводить до зменшення холодопродуктивності циклу у порівнянні зі зворотним циклом Карно.

Одже, з рис. 9.4 видно, що кількість тепла q_2 , що відбирається від холодного джерела у циклі пароконпресійної холодильної установки, зображується площею 3–b–a, тоді як кількість тепла q_2 у зворотному циклі Карно зображується більшою площею 3–b–c.

Цикл абсорбційної холодильної установки.

Ще одним різновидом холодильних циклів, у яких використовується холодоагент у вигляді вологій пари, є цикл абсорбційної холодильної установки. Від інших циклів парових холодильних установок він відрізняється способом стискання пари, що виходить із випарника.

У розглянутій установці використовується явище абсорбції (поглинання речовини повним об'ємом поглинаючого тіла) пари рідким розчином. На відміну від чистих речовин розчини мають здатність абсорбувати (поглинати) пару розчину одного складу рідким розчином іншого складу навіть у тому випадку, коли температура рідини вище температури пари. Саме ця властивість розчину і використовується у абсорбційних холодильних установках.

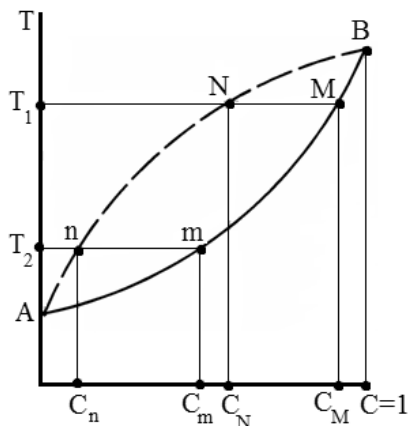


Рисунок 9.5. – Цикл абсорбційної холодильної установки у TS-координатах

Температура кипіння бінарного розчину під постійним тиском залежить від складу розчину. При цьому вона буде тим вище, чим більша у розчині частка компонента з більш високою температурою кипіння. Залежність температури кипіння бінарного розчину під постійним тиском від складу розчину зображується кривою кипіння (суцільна лінія) на TS-діаграмі (рис. 9.5), де C – вагова частка високо киплячого компонента.

Характерною рисою розчинів є те, що пара, яка виходить при кипінні розчину, має інший склад, ніж рідкий розчин, що перебуває з нею у рівновазі: пара більш збагачена низько киплячим компонентом. Крива пари – лінія складу пари, що перебуває у рівновазі з рідиною, зображена пунктирною лінією. Як видно на рис. 9.5 за температури T_1 у рівновазі з рідким розчином складу C_M перебуває пара розчину C_N , а за T_2 рідкому розчину C_m відповідає пара складу C_n . Якщо тепер пару складу C_n , що має температуру T_2 , привести у взаємодію з рідким розчином складу C_M за температури T_1 , стосовно якого пара складу C_n є переохолодженою, то очевидно, що пара буде конденсуватися (абсорбуватися рідким розчином). Тиск рідини і пари у цьому процесі має одне значення. Теплота пароутворення, що виділяється у процесі абсорбції за температури T_1 , відводиться з розчину. У результаті абсорбції виходить розчин складу C , причому $C_m < C < C_n$.

Схема абсорбційної холодильної установки зображена на рис. 9.6.

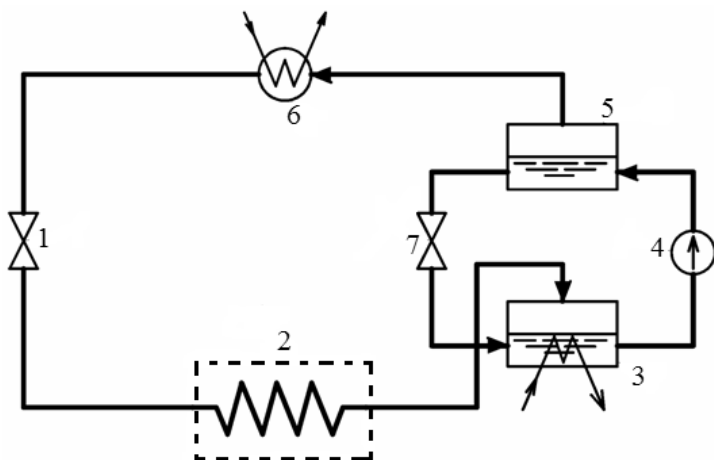


Рисунок 9.6. – Схема абсорбційної холодильної установки

У якості одного з можливих холодоагентів у такій установці використовується волога пара аміаку. Рідкий насичений аміак дроселюється у редукційному вентилі 1 від тиску P_1 до тиску P_2 , охолоджується від температури T_1 до температури T_2 . Потім волога пара аміаку надходить у випарник 2, де ступінь сухості пари збільшується до $x = 1$ за рахунок підведення тепла q_2 від охолоджуваного об'єму. Суха насичена пара аміаку за температури T_2 надходить у абсорбер 3, куди подається також розчин аміаку у воді, що має температуру T_1 . Оскільки при тому самому тиску вода кипить за значно більш високої температури, ніж аміак, то легко киплячим компонентом у цьому розчині є аміак. Цей розчин абсорбує пару аміаку; тепло абсорбції $q_{абс}$, що виділяється при цьому, відводиться охолоджуючою водою.

Концентрація аміаку у розчині у процесі збільшується і, отже, з абсорбера виходить збагачений розчин. За допомогою насоса 4, що підвищує тиск цього збагаченого розчину від P_2 до P_1 , він подається у генератор аміачної пари 5, де за рахунок тепла $q_{нг}$, яке підводиться до розчину від зовнішнього джерела, відбувається випаровування розчину. Пара, що виділяється при цьому значно більш збагачена аміаком, ніж розчин, з якого він одержується. Потім ця аміачна пара за температури T_1 і під тиском P_1 надходить у конденсатор 6, де вона конденсується і рідкий аміак у стані насичення направляється у редукційний вентиль 1. А бідний аміачком розчин, що виходить із парогенератора 5, дроселюється у редукційному вентилі 7 від тиску P_1 до тиску P_2 і потім надходить у абсорбер 3, де збагачується аміаком за рахунок аміачної пари. При дроселюванні температура цього бідного розчину практично не змінюється ($T_I = T_{II}$).

З наведеної схеми установки (рис. 9.6) видно, що абсорбційний вузол установки, який складається з абсорбера 3, генератора аміачної пари 5, насоса 4 і редукційного вентиля 7, служить для стиснення аміачної пари від тиску p_2 (на виході з випарника) до тиску p_1 (на вході у конденсатор). У випадку абсорбційної установки насос 4 підвищує тиск рідини, причому витрата роботи на привод цього насоса дуже мала у порівнянні з витратою роботи у компресорі. Звичайно, перевага у роботі компенсується витратою тепла у генераторі аміачної пари 5. Це тепло потім виділяється охолоджуючою водою у абсорбері 3, так що $q_{\text{абс}} = q_{\text{пр}}$.

Коефіцієнт тепловикористання абсорбційної холодильної установки визначається наступним відношенням:

$$\xi = \frac{q_2}{q_{\text{пр}}}, \quad (9.3)$$

де q_2 – теплота, що виділяється з охолоджуваного об'єму;

$q_{\text{пр}}$ – теплота, що підводиться у генератор аміачної пари.

Раніше абсорбційні холодильні установки були досить широко поширені, однак з розвитком компресоробудування вони були витиснені компресійними холодильними установками. Однак абсорбційне охолодження і зараз застосовується у холодильній техніці (у тому числі у деяких типах побутових холодильників). Абсорбційні холодильні установки доцільно застосовувати у тому випадку, коли для випаровування аміаку з розчину у генераторі аміачної пари може бути використана відпрацьована пара або інші теплоносії низького температурного потенціалу.

Принцип роботи теплового насоса.

У процесі роботи будь-якої холодильної установки тепло відбирається з охолоджуваного об'єму і підводиться до середовища з більш високою температурою. Отже, результатом здійснення холодильного циклу є не тільки охолодження тепловіддавача, але і нагрівання теплоприймача.

Це дозволило Кельвіну у 1852 році висунути пропозицію щодо використання холодильного циклу для опалення приміщень, тобто про створення так званого теплового насоса.

Тепловим насосом називається холодильна установка, що звичайно використовується для підведення тепла до об'єму, що нагрівається. Вона як би «перекачує» тепло з холодного джерела у гаряче; у гаряче джерело надходить тепло q_1 , яке дорівнює сумі тепла q_2 , відібраного від холодного джерела, і роботи $l_{\text{ц}}$, що підведена ззовні для здійснення цього холодильного циклу.

Ефективність теплового насоса оцінюється величиною так званого опалювального коефіцієнта, що представляє собою відношення кількості тепла q_1 , яке підведене до об'єму, що нагрівається, до величини роботи $l_{\text{ц}}$, підведеної у цикл:

$$\varepsilon_{\text{опал}} = \frac{q_1}{l_{\text{ц}}} \quad (9.4)$$

$$q_1 = q_2 + l_{\text{ц}} \quad (9.5)$$

$$\varepsilon_{\text{опал}} = \varepsilon + 1 \quad (9.6)$$

Зі співвідношення (9.6) випливає, що чим вище холодильний коефіцієнт, тим вище і опалювальний коефіцієнт циклу.

На здійснення будь-якого холодильного циклу витрачається підведена від зовнішнього джерела робота $l_{\text{ц}}$. Ця робота витрачається на привод компресора або іншого апарата, що здійснює стискання холодоагенту.

Оскільки у тепловому насосі завжди $q_1 > l_{\text{ц}}$, отже, завжди $\varepsilon_{\text{опал}} > 1$; це видно з рівняння (9.6).

Звичайно величина опалювального коефіцієнта оборотних циклів теплових насосів значно більше одиниці. Так, наприклад, якщо у тепловому насосі здійснюється зворотний цикл Карно, то у тому випадку, якщо температура охолоджуваного простору $T_2 = 0^\circ\text{C}$, а температура приміщення, що нагрівається, $T_1 = 25^\circ\text{C}$, опалювальний коефіцієнт такого насоса визначається наступним чином:

$$\varepsilon_{\text{опал}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} + 1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{25 + 273,15}{25} = 11,9 \quad (9.7)$$

Тобто у цьому випадку у опалювальне приміщення подається тепло, кількість якого у 11,9 рази перевищує величину роботи, витраченої у циклі.

Зменшення $\varepsilon_{\text{опал}}$ у реальних установках викликається також неминучими втратами внаслідок необоротності процесів у різних елементах установки. Опалювальний коефіцієнт реальних теплових насосів може становити 3,4 і більше.

У теплових насосах використовуються цикли повітряних, парокompресійних і термоелектричних холодильних установок.

9.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Визначити холодильний коефіцієнт ε оборотного циклу Карно за температури теплоприймача $t_1 = 20^\circ\text{C}$ і за температури тепловіддавача $t_2 = -20^\circ\text{C}$. Як буде змінюватись $\varepsilon_{\text{Карно}}$ при збільшенні t_1 (20, 30, 40, 50°C) і незмінній t_2 , а також при зменшенні t_2 (0, -10 , -20 , -30 , -40°C) і незмінній t_1 ?

Розв'язання.

Холодильний коефіцієнт циклу визначають:

$$\varepsilon = \frac{1}{T_1/T_2 - 1} = \frac{1}{1,158 - 1} = 6,33.$$

Значення ε_1 за інших температур t_1 будуть наступні:

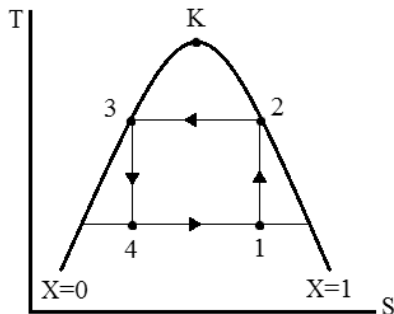
$t_1, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50
ε	6,95	5,07	4,23	3,65

Значення ε_2 за інших температур t_2 будуть наступні:

$t_2, ^\circ\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40
ε	13,65	8,46	6,35	4,85	3,88

Відповідь. Холодильний коефіцієнт ε_1 змінюється від 6,95 до 3,65, а ε_2 – 13,65–3,88.

Приклад 2. Холодильна установка працює за циклом Карно, робоче тіло – пара аміаку. Параметри пари: $t_1 = -10^\circ\text{C}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$ $X_2 = 1$, $X_3 = 0$ (див. рисунок). Визначити холодопродуктивність аміаку, теплове навантаження конденсатора, роботу, яка витрачена у циклі і холодильний коефіцієнт.



Розв'язання.

Параметри пари аміаку визначаються по таблицею додатку.

Холодопродуктивність установки визначають наступним чином:

$$q_0 = h_1 - h_4 = r_1'(X_1 - X_4).$$

За $t_1 = -10^\circ\text{C}$ і $r_1 = 1296,6$ кДж/кг приймаючи процеси 1–2 і 3–4 адіабатними, маємо:

$$S_2 = S_1 = S' + (S''_1 + S'_1) \cdot X;$$

$$S'_1 = 4,071 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$S''_1 = 8,944 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$S_2 = S''_2 = 8,566 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$X_1 = (S''_2 - S'_1)/(S''_1 - S'_1) = (8,566 - 4,071)/(8,944 - 4,071) = 0,9224;$$

$$X_4 = (S''_2 - S'_1)/(S''_1 - S'_1) = (4,516 - 4,017)/4,917 = 0,1015.$$

Отже:

$$q_0 = 1296,6 \cdot (0,9224 - 0,1015) = 1064,4 \text{ кДж/кг}.$$

Теплове навантаження конденсатора:

$$q = h_2 - h_3 = r_2 = 1186,9 \text{ кДж/кг}.$$

Робота, витрачена у циклі:

$$l = q - q_0 = 1186,9 - 1064,4 = 122,5 \text{ кДж/кг}.$$

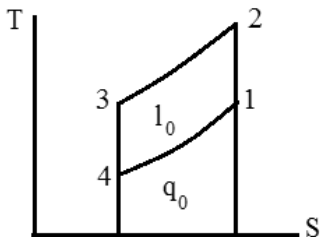
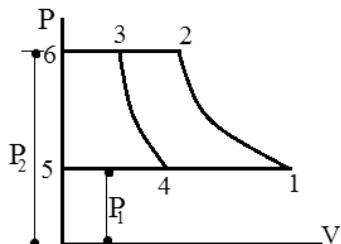
Холодильний коефіцієнт:

$$\varepsilon_X = q_0/l = 1064,4/122,5 = 8,69.$$

Відповідь. Холодопродуктивність аміаку дорівнює 1064,4 кДж/кг, теплове навантаження конденсатора – 1186,9 кДж/кг, робота, яка витрачена у циклі – 122,5 кДж/кг, холодильний коефіцієнт – 8,69.

Приклад 3. Розрахувати цикл повітряно-компресорного холодильника. Дані для розрахунків наведені у таблиці:

P_1 , МПа	P_2 , МПа	t_1 , °C	t_3 , °C	Q_x , кВт
0,1	0,4	– 8	22	130



Ділянка (1–2): адіабатне стискання у компресорі.

Ділянка (2–3): ізобарний процес відведення тепла у теплообмінник.

Ділянка (3–4): адіабатне розширення газу у детандері.

Ділянка (4–1): ізобарне нагрівання повітря у холодильній камері.

$S_1 - S_2$ – холодопродуктивність.

Розв'язання.

1–2 – процес адіабатний ($S = \text{const}$):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}};$$

$$T_2 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_1 = \left(\frac{0,4}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \cdot 265 = 393 \text{ K};$$

$$C_p = 1,008 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$C_v = 0,721 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

3 – 4 – процес адіабатного розширення повітря у детандері:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}};$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 295 \cdot \left(\frac{0,1}{0,4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 199 \text{ K}.$$

Визначимо q_T , передану воді у теплообміннику:

2–3 – процес ізобарний:

$$q_T = C_p (T_3 - T_2) = 1,008 \cdot (295 - 393) = -99 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Визначимо холодопродуктивність, відведену кількість тепла:

$$q_x = C_p (T_1 - T_4) = 1,008 \cdot (265 - 199) = -66 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Визначимо масову частку витрати (M – масова витрата повітря у холодильнику):

$$Q_x = M \cdot q_x \Rightarrow M = \frac{Q_x}{q_x} = \frac{130}{66} = 1,97 \text{ кг/с}.$$

Споживана потужність, витрачена на привід компресора:

$$Q_K = Q_T - Q_x;$$

$$Q_T = q_T \cdot M = 99 \cdot 1,97 = 195 \text{ кВт};$$

$$Q_K = 195 - 130 = 65 \text{ кВт}.$$

Знайдемо холодильний коефіцієнт:

$$\varepsilon = \frac{q_x}{q_K} = \frac{66}{33} = 2.$$

Де:

$$q_K = q_T - q_x = 99 - 66 = 33 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

9.2. Питання для самоконтролю

1. Що таке холодильний коефіцієнт і коефіцієнт трансформації теплоти (опалювальний коефіцієнт)? Як пов'язані ці величини?
2. Зобразіть принципову схему повітряної холодильної установки і її ідеальний цикл у координатах P – V і T – S .
3. Яке призначення детандера у повітряній холодильній установці і чому його не можна замінити дросельним вентилем?
4. Зобразіть схему парокompресійної холодильної установки із дросельним вентилем і її ідеальний цикл у координатах T – S .
5. Які переваги має парокompресійна холодильна установка у порівнянні з повітряною?
6. У чому полягає принцип дії теплового насоса?
7. Зобразіть принципову схему абсорбційної холодильної установки. Як підвищується тиск холодоагенту у цій установці?
8. Як впливає переохолодження холодоагенту після конденсатора на значення коефіцієнта трансформації теплоти теплонасосної установки?
9. Які властивості повинні мати холодоагенти?
10. Опишіть основні методи скраплення газів.

9.3. Тестові питання

1. За оборотним циклом Карно працюють:

- а) теплові двигуни;
- б) парові турбіни;
- в) двигуни внутрішнього згорання;
- г) холодильні установки.

2. Холодильний коефіцієнт зворотного циклу Карно визначається за виразом:

а) $\varepsilon_{\kappa} = \frac{\ell_{\text{цикла}}}{q_2} = \frac{q_1 - q_2}{q_2} = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$;

б) $\varepsilon_{\kappa} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$;

в) $\varepsilon_{\kappa} = \frac{q_2}{\ell_{\text{цикла}}} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$;

г) $\varepsilon_{\kappa} = \frac{\ell_{\text{цикла}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

3. Які процеси утворюють теоретичний цикл повітряної холодильної машини?

а) ізотермічні – підведення і відведення теплоти і адіабатні – стискання і розширення холодоагенту;

б) ізотермічні – підведення і відведення теплоти і політропні – стискання і розширення;

в) ізобарні – підведення і відведення теплоти і адіабатні – стискання і розширення;

г) ізобарні – підведення і відведення теплоти і політропні – стискання і розширення.

4. Що таке холодильний коефіцієнт ε холодильної установки?

а) відношення теплоти q_2 , що відводиться від охолоджуваного тіла, до теплоти q_1 , що відводиться у навколишнє середовище;

б) відношення q_1/q_2 ;

в) відношення q_1 до роботи l , яка витрачається компресором на стискання холодоагенту;

г) відношення q_2/l .

5. У чому перевага теплового насоса у порівнянні з електронагрівачем?

а) зменшення витрат на виготовлення;

б) простота і безпека обслуговування;

- в) екологічна чистота;
- г) зменшення витрати енергії.

9.4. Задачі

Задача 1. Волога пара холодоагенту R12 зі стану 1 ($t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_1 = 0,91$) адіабатно розширяється до стану 2, у якому $t_2 = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити значення P , t , v , h , s , u , x у станах 1 і 2, і зміни питомої внутрішньої енергії у цьому процесі. Показати процес на PV -, TS - і hs -діаграмах.

Задача 2. Суха пара аміаку з початковою температурою $t_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ у результаті охолодження за постійного об'єму переходить у двофазний стан 2, у якому $t_2 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Потім у ізобарному процесі аміак нагрівається до стану 3, у якому ступінь сухості аміаку $x_3 = 0,8$. Визначити значення P , v , h , s , u , x у стані 2 і питому теплоту процесу 1–2–3. Показати процес 1–2–3 на PV -, TS - і hs -діаграмах.

Задача 3. Волога пара фреону за температури $t_1 = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ надходить у компресор, де адіабатно стискається до тиску, при якому його температура стає рівною $t_2 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, а сухість пари $x_2 = 1$. З компресора фреон надходить у конденсатор, де під постійним тиском повертається у рідину, після чого розширяється у дроселі (дроселюється) до температури $t_4 = t_1$. Визначити холодильний коефіцієнт установки, масову витрату фреону, а також теоретичну потужність привода компресора, якщо холодопродуктивність установки $Q = 190\text{ кВт}$. Зобразити схему установки і її цикл на TS - і hs -діаграмах. Визначити також холодильний коефіцієнт установки і холодопродуктивність установки, що змінилася, при збільшенні t_2 на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при одночасному зменшенні t_1 на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (витрату холодоагенту прийняти незмінною). Завдання зручніше вирішувати за допомогою TS -діаграми фреону-12 (R12).

Задача 4. Аміачна холодильна машина працює за температури випаровування $t_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пара з випарника виходить сухою насичена. Температура конденсації пари $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вона досягається у результаті процесу дроселювання. Визначити холодильний коефіцієнт і зобразити цикл установки у PV - і TS -координатах.

Задача 5. Теоретична потужність аміачного компресора холодильної установки складає $N = 50\text{ кВт}$. Температура випаровування аміаку $t_1 = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$. З компресора пара виходить сухою насиченою, за температури $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура рідкого аміаку знижується у дросельному вентилі. Визначити годинну холодопродуктивність 1 кг аміаку і усієї установки.

Задача 6. Визначити холодильний коефіцієнт холодильної установки, що працює за вологим циклом Карно, якщо температура у випарнику – 30°C , а у конденсаторі 27°C .

Задача 7. Обчислити теоретичну потужність, затрачену аміачною холодильною установкою, холодопродуктивністю $Q_0 = 17,4 \text{ кВт}$, що працює за циклом Карно якщо температура випаровування дорівнює 19°C , а конденсації – 15°C .

Задача 8. Визначити для вуглекислотної холодильної установки, що працює за вологим циклом, питому холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт, кількість теплоти, що виділяється у конденсаторі, кількість холодильного агента і потужність електродвигуна, якщо температура випаровування – 30°C , а конденсації – 16°C . Холодопродуктивність установки $Q_0 = 58,15 \text{ кВт}$.

10. ПАЛИВО І ЙОГО СПАЛЮВАННЯ

Горіння палива – хімічна реакція сполучення горючих елементів палива з окиснювачем за високої температури, що супроводжується інтенсивним виділенням теплоти. У якості окиснювача використовують кисень повітря.

Процеси горіння поділяють на дві групи:

1) гомогенне горіння – горіння газоподібних горючих (характеризується системою «газ + газ»);

2) гетерогенне горіння – горіння твердих і рідких горючих (характеризується системою «тверде тіло + газ» або «рідина + газ»).

Процес горіння може протікати з різною швидкістю – від повільного до миттєвого. Повільне горіння – самозаймання твердого палива при його зберіганні на складах. Миттєве горіння являє собою вибух.

У теплоенергетичних установках практичне значення має така швидкість реакції, за якої відбувається стійке горіння, тобто за постійної подачі у зону горіння палива і окиснювача. При цьому співвідношення концентрації палива і окиснювача повинно бути певним. При порушенні цього співвідношення (збагачена суміш, бідна суміш) швидкість реакції знижується і зменшується тепловиділення на одиницю об'єму.

Горіння – це в основному хімічний процес, тому що у результаті його протікання відбуваються якісні зміни складу реагуючих мас. Але у той же час хімічна реакція горіння супроводжується різними фізичними явищами: перенесення теплоти, дифузійне перенесення реагуючих мас та ін.

Час горіння палива складається з часу протікання фізичних ($\tau_{\text{фіз}}$) і хімічних процесів ($\tau_{\text{хім}}$):

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{фіз}} + \tau_{\text{хім}}. \quad (10.1)$$

Час протікання фізичних процесів складається з часу, необхідного для змішування палива з окиснювачем ($\tau_{\text{зм}}$) і часу, у плинні якого паливно-повітряна суміш підігрівається до температури запалення (t_n):

$$\tau_{\text{фіз}} = \tau_{\text{зм}} + \tau_n. \quad (10.2)$$

Час горіння ($\tau_{\text{гор}}$) визначається швидкістю найбільш повільного процесу.

Горіння газоподібного палива.

Мінімальна температура за якої відбувається запалення суміші, називається температурою запалення. Значення цієї температури для різних газів неоднакове і залежить від теплофізичних властивостей горючих газів, вмісту пального у суміші, умов запалення, умов відведення теплоти у кожному конкретному пристрої та ін.

Горючий газ у суміші з окиснювачем згоряє у факелі. Розрізняють два методи спалювання газу у факелі – кінетичний і дифузійний.

За кінетичного спалювання до початку горіння газ попередньо змішується з окиснювачем у пристрої пальника. Горіння суміші здійснюється

поза межами змішувача. При цьому швидкість горіння не повинна перевищувати швидкості хімічних реакцій горіння $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{хім}}$.

Дифузійне горіння відбувається у процесі змішування горючого газу з повітрям. Газ надходить у робочий об'єм окремо від повітря. Швидкість процесу буде обмежена швидкістю змішування газу з повітрям $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{фіз}}$.

Крім цього існує змішане (дифузійно-кінетичне) горіння. При цьому газ попередньо змішується з деякою кількістю повітря, потім одержана суміш надходить у робочий об'єм, де окремо подається інша частина повітря.

У паливних котлових агрегатах в основному використовують кінетичний і змішаний способи спалювання палива.

Горіння твердого палива.

Процес горіння складається з наступних стадій:

1) підсушування палива і нагрівання до температури початку виходу летучих речовин;

2) запалення летучих речовин і їх вигорання;

3) нагрівання коксу до запалення;

4) вигорання горючих речовин з коксу.

Ці стадії іноді частково накладаються одна на одну.

Вихід летучих речовин у різного палива починається за різних температур: торф – 550–660 К, буре вугілля – 690–710 К, антрацит – 1050–1070 К.

Горіння рідкого палива.

Основним рідким паливом, що використовується у теплоенергетиці та промисловій теплотехніці є мазут. В установках невеликої потужності також використовують суміш технічного гасу зі смолами.

Найбільше застосування одержав метод спалювання у розпиленому стані. Цей метод дозволяє значно прискорити його згорання і одержати високі теплові напруги об'ємів топкових камер внаслідок збільшення площі поверхні контакту палива з окиснювачем.

Процес горіння рідкого палива можна розділити на наступні стадії:

1) нагрівання і випаровування палива;

2) утворення горючої суміші;

3) запалення горючої суміші від стороннього джерела (іскри, розпеченої спіралі ті ін.);

4) безпосередньо горіння суміші.

Теплота згорання палива.

Теплота згорання палива – кількість теплоти, що виділяється при повному згоранні одиниці маси (кДж/кг) або об'єму (кДж/м³) палива. Розрізняють вищу і нижчу теплоту згорання.

Вища теплота згорання $Q_{\text{в}}$ – повна кількість теплоти, яка виділяється при згоранні 1 кг твердого або рідкого палива (або 1 м³ газового палива) за умови, що водяна пара, яка утворюється при згоранні, конденсується і повертається їх теплота конденсації $Q_{\text{кон}}$.

У парових котлах продукти згоряння не охолоджуються до температури конденсації пари. У цих умовах теплота конденсації губиться і загальне використовуване тепловиділення буде менше. Кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні 1 кг твердого або рідкого (або 1 м³ газового) палива за винятком теплоти конденсації водяної пари, називають нижчою теплотою згоряння Q_H .

Вища теплота згоряння пов'язана з нижчою теплотою згоряння палива співвідношенням:

$$Q_B = Q_H + Q_{\text{кон}}. \quad (10.3)$$

В основному для розрахунків параметрів спалювання палива використовується саме нижча теплота згоряння палива. Для визначення нижчої теплоти згоряння використовуються наступні рівняння:

– для твердого і рідкого палива:

$$Q_H^p = 338C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S^p) - 25W^p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (10.4)$$

де індекс «р» – позначає «робоче»

– для газоподібного палива

$$Q_H^p = 358C H_4 + 640C_2H_6 + 915C_3H_8 + 1190C_4H_{10} + \\ + 1458C_5H_{12} + 126,5CO + 107,5H_2 + 257H_2S \left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right] \quad (10.5)$$

Значення усіх компонентів рівнянь підставляються у %.

Визначення теоретичної та дійсної витрати повітря на горіння палива.

Горючі речовини палива взаємодіють з киснем повітря у певному кількісному співвідношенні. Витрату кисню і кількість продуктів згоряння, що виходять, розраховують за стехіометричними рівняннями горіння, які записують для 1 кмоль кожної горючої складової.

Об'ємна кількість повітря, необхідного для горіння 1 кг твердого або рідкого палива може бути розрахована за наступною формулою:

$$V^0 = 0,0889 C^p + 0,265 H^p - 0,033 (O^p - S^p). \quad (10.6)$$

Теоретичну кількість повітря (м³/м³), необхідного для спалювання газу, визначають за формулою:

$$V^0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (10.7)$$

Кількість повітря V^0 , що розраховується за формулами (10.6) і (10.7), називається теоретично необхідною. Тобто V^0 являє собою мінімальну кількість повітря, необхідну для забезпечення повного згоряння 1 кг (1 м³) палива за умови, що при горінні використовується весь кисень, що міститься у паливі і подається разом з повітрям. У реальних умовах через технічні труднощі відчувається місцевий недолік або надлишок окиснювача (повітря), у результаті погіршується повне горіння палива. Тому повітря подається у більшій кількості у порівнянні з його теоретичною кількістю V^0 . Відношення

дійсної кількості повітря (V_d), що подається у топку, до теоретично необхідної кількості називається коефіцієнтом надлишку повітря:

$$\alpha = \frac{V_d}{V^0}. \quad (10.8)$$

Кількість продуктів згоряння палива.

При повному згорянні палива продукти згоряння містять гази: CO_2 , S_2O , N_2 , O_2 і пари води H_2O , тобто $\text{CO}_2 + \text{S}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 100\%$.

Повний об'єм продуктів згоряння V_r ($\text{м}^3/\text{кг}$) являє собою суму об'ємів сухих газів $V_{c.r.}$ і водяної пари $V_{\text{H}_2\text{O}}$:

$$V_r = V_{c.r.} + V_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (10.9)$$

при цьому $V_r = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}$,

де $V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$ – об'єм трьохатомних газів, $\text{м}^3/\text{кг}$;

$V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}$ – об'єм двохатомних газів, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Для твердого і рідкого палива теоретичні об'єми ($\text{м}^3/\text{кг}$) продуктів повного згоряння визначаються за формулами:

а) об'єм двохатомних газів:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N; \quad (10.10)$$

б) об'єм трьохатомних газів:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,0187(C^p + 0,375S^p); \quad (10.11)$$

в) об'єм водяної пари:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,0124(9H^p + W^p) + 0,0161V^0; \quad (10.12)$$

г) повний об'єм продуктів згоряння:

$$V_r^0 = V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0; \quad (10.13)$$

Для газоподібного палива теоретичні об'єми продуктів згоряння ($\text{м}^3/\text{м}^3$) визначаються за формулами:

а) об'єм двохатомних газів:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N; \quad (10.14)$$

б) об'єм трьохатомних газів:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \Sigma m C_m H_n); \quad (10.15)$$

в) об'єм водяної пари:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 \left[\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \Sigma \left(\frac{n}{2} \right) C_m H_n + 0,124d_r + 0,0161V^0 \right], \quad (10.16)$$

де d_r – вологовміст газоподібного палива, віднесений до 1 м^3 сухого газу, $\text{г}/\text{м}^3$;

д) повний об'єм продуктів згоряння визначається за формулою (10.13).

Для твердого, рідкого та газоподібного палива об'єми продуктів повного згоряння ($\text{мд}/\text{кг}$) визначаються за формулами:

а) об'єм двохатомних газів:

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha - 1)V^0; \quad (10.17)$$

б) об'єм водяної пари:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0; \quad (10.18)$$

в) повний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\Gamma} = V_{N_2} + V_{RO_2} + V_{H_2O}. \quad (10.19)$$

Вміст CO_2 , SO_2 і RO_2 у сухих газах при повному згорянні палива визначається за формулами:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\Gamma}}; \quad (10.20)$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{\Gamma}}; \quad (10.21)$$

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{\Gamma}}. \quad (10.22)$$

Маса продуктів згоряння визначається у такий спосіб:

а) для твердого (крім сланців) і рідкого палива (кг/кг):

$$M_{\Gamma} = 1 - 0,01 A^p + 1,306 \cdot \alpha \cdot V^0; \quad (10.23)$$

б) для газоподібного палива (кг/м³):

$$M_{\Gamma} = \rho_{г.т.}^c + 0,001d_{г.т.} + 1,306 \cdot \alpha \cdot V^0, \quad (10.24)$$

$\rho_{г.т.}^c$ – густина сухого газу, кг/м³;

$d_{г.т.}$ – вміст води у паливі, кг/м³.

Для твердого палива концентрація золи у продуктах згоряння визначається за формулою:

$$\mu_{зл} = \frac{A^p a_{вин}}{100M_{\Gamma}}, \quad (10.25)$$

де $a_{вин}$ – частка золи палива, що виноситься продуктами згоряння.

Коефіцієнт надлишку повітря у топці.

При повному згорянні палива коефіцієнт надлишку повітря у топці визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{N_2}}, \quad (10.26)$$

де O_2 і N_2 – вміст кисню і азоту у газах, (%).

10.1. Приклади розрахунків

Приклад 1. Визначити кількість повітря, теоретично необхідну для спалювання 1 кг палива наступного складу: $C^p = 37,2\%$; $H^p = 2,6\%$; $S^p = 0,6\%$; $N^p = 0,4\%$; $O^p = 12\%$; $W^p = 40\%$; $A^p = 7,2\%$. Визначити також об'єм продуктів згоряння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,2$.

Розв'язання.

Визначаємо теоретичну необхідну кількість повітря:

$$V^0 = 0,0889 \cdot 37,2 + 0,265 \cdot 2,6 - 0,033 \cdot (12,0 - 0,6) = 3,613 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Обчислюємо об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866 \cdot (37,2 + 0,375 \cdot 0,6) = 0,698 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0124 \cdot (9 \cdot 2,6 + 40) + 0,0161 \cdot 3,613 = 0,844 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot 3,613 + 0,008 \cdot 0,4 = 2,857 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_r = 0,698 + 0,844 + 2,857 + 1,0161 \cdot (1,2 - 1) \cdot 3,613 = 5,143 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\text{Відповідь. } V^0 = 3,613 \text{ м}^3/\text{кг}, V_r = 5,143 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Приклад 2. Визначити кількість продуктів згоряння палива, склад яких наступний:

1) 40 кг вугілля: $C^p = 47,4\%$; $H^p = 3,2\%$; $O^p = 9,7\%$; $S^p = 2,5\%$; $W^p = 11,0\%$; $N^p = 1,3\%$; $A^p = 24,9\%$.

2) 60 м³ газоподібного палива: $CO = 25\%$; $H_2 = 14\%$; $C_mH_n = 0,3\%$; $CH_4 = 2,2\%$; $CO_2 = 6,5\%$; $O_2 = 0,2\%$; $N_2 = 50,6\%$.

Розв'язання.

Знаходимо теоретичний об'єм повітря, необхідний для спалювання 1 кг твердого палива:

$$V^0 = 0,0889 \cdot 47,4 + 0,265 \cdot 3,2 - 0,033 \cdot (9,7 - 2,5) = 4,83 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866 \cdot (47,4 + 0,375 \cdot 2,5) = 0,90 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot 3,2 + 0,0124 \cdot 11 + 0,0161 \cdot 4,83 = 0,58 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot 4,83 + 0,008 \cdot 1,3 = 3,83 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_r^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 5,31 \text{ м}^3/\text{кг}, \text{ для 1 кг вугілля.}$$

$$\text{Для 40 кг вугілля } V_r^0 = 212,4 \text{ м}^3.$$

Знаходимо теоретичний об'єм повітря, необхідний для спалювання 1 м³ газоподібного палива:

$$V^0 = 0,0476 \cdot (0,5 \cdot 25 + 0,5 \cdot 14 + 3 \cdot 2,2 + 0,3 - 0,2) = 1,25 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм азоту:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot 1,25 + 0,01 \cdot 50,6 = 1,49 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об'єм трьохатомних газів:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 \cdot (6,5 + 25 + 2,2 + 0,3) = 0,34 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм водяної пари:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 \cdot (14 + 4,4 + 0,3) + 0,0161 \cdot 1,25 = 0,21 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм продуктів згоряння:

$$V_r^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 2,04 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$\text{Для 60 м}^3 \text{ газоподібного палива } V_r^0 = 122,4 \text{ м}^3.$$

$$\text{Відповідь. } V_r^0 \text{ (вугілля)} = 212,4 \text{ м}^3. V_r^0 \text{ (газоподібне паливо)} = 122,4 \text{ м}^3.$$

Приклад 3. Визначити теплоту згоряння, теоретичний об'єм продуктів згоряння і кількість повітря, теоретично необхідну для спалювання 1 кг суміші:

1) 40% вугілля: $C^p = 62,1\%$; $H^p = 4,2\%$; $O^p = 6,4\%$; $S^p = 3,3\%$; $W^p = 7\%$; $N^p = 1,2\%$; $A^p = 15,8\%$.

2) 60% вугілля: $C^p = 38,6\%$; $H^p = 2,6\%$; $O^p = 3,1\%$; $S^p = 3,8\%$; $W^p = 11\%$; $N^p = 0,8\%$; $A^p = 40,1\%$.

Для суміші: $C^p = 48\%$; $H^p = 3,2\%$; $O^p = 4,4\%$; $S^p = 3,6\%$; $W^p = 9,4\%$; $N^p = 1,0\%$; $A^p = 30,4\%$.

Розв'язання.

Знайдемо теоретичний об'єм повітря, необхідний для спалювання 1 кг твердого палива:

$$V^0 = 0,4(0,0889 \cdot 62,1 + 0,265 \cdot 4,2 - 0,033(6,4 - 3,3)) + 0,6(0,0889 \cdot 38,6 + 0,265 \cdot 2,6 + 0,033 \cdot 0,7) = 5,09 \text{ м}^3/\text{кг};$$

Визначаємо об'єм продуктів згоряння:

$$V_{RO_2} = 0,01866(48 + 0,375 \cdot 3,6) = 0,92 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot 3,2 + 0,0124 \cdot 9,4 + 0,0161 \cdot 5,09 = 0,56 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{N_2}^0 = 0,795 \cdot 0,9 + 0,008 \cdot 1,0 = 4,03 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{г}}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 = 5,51 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо теплоту згоряння:

$$Q_{\text{н}}^p = 338 \cdot 48 + 1025 \cdot 3,2 - 108,5(4,4 - 3,6) - 25 \cdot 9,4 = 19182,2 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{Відповідь. } Q_{\text{н}}^p = 19182,2 \text{ кДж/кг, } V_{\text{г}}^0 = 5,51 \text{ м}^3/\text{кг, } V^0 = 5,09 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

10.2. Питання для самоконтролю

1. Що таке горіння палива?
2. Як визначається час горіння палива?
3. Що таке теплота згоряння палива? Її різновиди.
4. Дати визначення коефіцієнта витрати повітря.
5. Охарактеризувати склад димових газів.
6. Як визначається концентрація золи у продуктах згоряння?

10.3. Тестові питання

1. Кількість теплоти, що виділяються при повному згорянні 1 кг твердого або рідкого палива або 1 м³ газоподібного палива, за нормальних умов називається:

- 1) нижчою питомою теплотою згоряння;
- 2) вищою питомою теплотою згоряння;
- 3) теплотою виділення;
- 4) питомою теплотою згоряння.

2. Коефіцієнтом надлишку повітря називається:

- 1) маса повітря, необхідна для повного згоряння палива;
- 2) маса повітря, необхідна для практичного згоряння палива;
- 3) маса повітря, необхідна для повного згоряння палива згідно з хімічною реакцією горіння;
- 4) відношення практично необхідної маси повітря до теоретично необхідної для повного згоряння палива.

3. Кінетичне горіння має місце:

- 1) при горінні попередньо змішаних газу і повітря;
- 2) при горінні роздільно поданих газу і повітря;
- 3) при горінні газу за надлишку повітря;
- 4) при горінні газу за нестачі повітря.

4. Швидкістю горіння називається:

- 1) час згоряння 1 кг палива;
- 2) маса згорілого палива за 1 годину;
- 3) швидкість поширення полум'я у певному напрямку;
- 4) годинна витрата палива.

5. Горючими елементами твердого і рідкого палива є:

- 1) C, H, O;
- 2) C, H, S;
- 3) C, N, O;
- 4) N, O, H.

10.4. Задачі

Задача 1. Визначити нижчу теплоту згоряння і об'єм повітря, що надходить у топку для спалювання вугілля даного складу за робочою масою. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,35$, температура повітря $t = 10^\circ\text{C}$, годинна витрата повітря $G = 300$ кг/ч. Дані для розрахунку: $C^p = 41,4\%$, $H^p = 2,9\%$, $O^p = 10,5\%$, $N^p = 1,0\%$, $S^p_{\text{л}} = 0,9\%$, $A^p = 24,3\%$, $W^p = 19,0\%$.

Задача 2. Визначити нижчу теплоту згоряння робочої маси вугілля наступного складу: $C^p = 37,3\%$; $H^p = 2,8\%$; $S^p_{\text{л}} = 1,0\%$; $O^p = 10,5\%$ і $W^p = 18,0\%$.

Задача 3. Визначити нижчу теплоту згоряння робочої маси вугілля наступного складу: $C^p = 37,3\%$; $H^p = 2,8\%$; $S^p_{\text{л}} = 1,0\%$; $N^p = 0,9\%$; $O^p = 10,5\%$; $A^p = 29,5\%$; $W^p = 18,0\%$, – за збільшення його вологості до $W^p = 20\%$.

Задача 4. Визначити теоретичний і дійсний об'єм повітря, необхідний для спалювання 1000 кг вугілля наступного складу: $C^p = 55,2\%$; $H^p = 3,8\%$; $S^p_{\text{л}} = 3,2\%$; $N^p = 1,0\%$; $O^p = 5,8\%$; $A^p = 23,0\%$; $W^p = 8,0\%$. Коефіцієнт надлишку повітря у топці $\alpha_t = 1,3$.

Задача 5. Визначити об'єм повітря, необхідний для спалювання 800 кг/год вугілля наступного складу: $C^p = 45,0\%$; $H^p = 2,6\%$; $S^p_{\text{л}} = 1,7\%$; $N^p = 0,4\%$; $O^p = 9,9\%$; $A^p = 11,4\%$; $W^p = 29,0\%$, і 500 кг/год вугілля складу: $C^p = 43,4\%$; $H^p = 2,9\%$; $S^p_{\text{л}} = 0,8\%$; $N^p = 0,8\%$; $O^p = 7,0\%$; $A^p = 38,1\%$; $W^p = 7,0\%$.

%, при коефіцієнтах надлишку повітря у топковій камері відповідно $\alpha_t = 1,4$ і $1,3$.

Задача 6. Визначити теоретичний і дійсний об'єм повітря, необхідний для спалювання $2000 \text{ м}^3/\text{год}$ природного газу наступного складу: $\text{CO}_2 = 0,5 \%$; $\text{CH}_4 = 92,8 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,8 \%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,9 \%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4 \%$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$; $\text{N}_2 = 2,5 \%$; і $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ природного газу складу: $\text{CO}_2 = 0,1 \%$; $\text{CH}_4 = 89,7 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 5,2 \%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,7 \%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,5 \%$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1 \%$; $\text{N}_2 = 2,7 \%$, при коефіцієнтах надлишку повітря у топковій камері відповідно $\alpha_t = 1,15$ і $1,1$.

Задача 7. Визначити об'єм водяної пари при повному згорянні у шарі $103 \text{ кг}/\text{год}$ фрезерного торфугу складу: $\text{C}^p = 24,7 \%$; $\text{H}^p = 2,6 \%$; $\text{S}^p_{\text{л}} = 0,1 \%$; $\text{N}^p = 1,1 \%$; $\text{O}^p = 15,2 \%$; $\text{A}^p = 6,3 \%$; $\text{W}^p = 50,0 \%$ при коефіцієнтах надлишку повітря у топці $\alpha_t = 1,35$ і $1,4$.

Задача 8. У топці котла спалюється 600 м^3 природного газу наступного складу: $\text{CO}_2 = 0,2 \%$; $\text{CH}_4 = 98,5 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,2 \%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,1 \%$; $\text{N}_2 = 1,0 \%$. Визначити об'єм продуктів згоряння при коефіцієнті надлишку повітря у топці $\alpha_t = 1,15$.

Задача 9. Визначити об'єм сухих газів, які одержують при повному згорянні у шарі 800 кг вугілля марки Д, якщо відомий склад його горючої маси: $\text{C}^r = 78,5 \%$; $\text{H}^r = 5,6 \%$; $\text{S}^r_{\text{л}} = 0,4 \%$; $\text{N}^r = 2,5 \%$; $\text{O}^r = 13,0 \%$; зольність сухої маси $\text{A}^c = 15,0 \%$ і робоча вологість $\text{W}^p = 12,0 \%$. Коефіцієнт надлишку повітря у топці $\alpha_t = 1,3$.

Задача 10. Визначити об'єм газів, які одержують при повному згорянні $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ природного газу наступного складу: $\text{CO}_2 = 0,1 \%$; $\text{CH}_4 = 85,8 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,2 \%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,1 \%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1 \%$; $\text{N}_2 = 13,7 \%$. Коефіцієнт надлишку повітря у топковій камері $\alpha_t = 1,1$.

11. МАТЕРІАЛЬНІ ТА ТЕПЛОВІ БАЛАНСИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Перед тим, як приступити до конструювання будь-якого апарату хімічного виробництва необхідно виконати докладний технохімічний розрахунок всього процесу виробництва або тієї його частини, яка безпосередньо зв'язана з апаратом, що конструюється. В основу будь-якого технохімічного розрахунку покладені два основних закони: закон збереження маси речовини і закон збереження енергії. На першому з законів базується матеріальний, а на другому – енергетичний, у тому числі і тепловий, баланси.

Таким чином, перш ніж приступити до складання матеріального і теплового балансу того чи іншого технологічного процесу, необхідно ясно і чітко представляти собі закономірності цього процесу.

Матеріальний баланс – відображає закон збереження маси речовини. Для усіх речовин, що беруть участь у процесі, він може бути представлений рівнянням, ліву частину якого утворює маса вихідних речовин $\sum G_{i, \text{вх}}$, а праву – маса одержаних продуктів $\sum G_{i, \text{вих}}$:

$$\sum G_{i, \text{вх}} = \sum G_{i, \text{вих}} \quad (11.1)$$

Окрім балансу за усіма речовинами, використовують баланс за окремими компонентами, який для i -ї речовини буде мати наступний вигляд:

$$G_{i, \text{вх}} = G_{i, \text{вих}} + G_{i, \text{витр}} \quad (11.2)$$

де $G_{i, \text{вх}}$ – маса i -ї речовини, яка поступає у процес;

$G_{i, \text{вих}}$ – маса i -ї речовини, яка залишилась по закінченню процесу;

$G_{i, \text{витр}}$ – маса i -ї речовини, яка перетворилась у системі.

Маса вихідних речовин враховує також виробничі витрати сировини і готового продукту. Джерелом продукції є хімічна реакція. Якщо речовина утворюється – $\Delta G_{i, \text{витр}} > 0$, якщо $\Delta G_{i, \text{витр}} < 0$, то речовина перетворюється у іншу.

Якщо у елементі відбувається ряд перетворень речовини, то:

$$\Delta G_{i, \text{витр}} = \sum_r^R \Delta G_{ir}, \quad (11.3)$$

де ΔG_{ir} – зміна кількості i -ї речовини у r -му перетворенні;

R – загальна кількість перетворень.

Декілька перетворень речовини може відбуватись або за протікання складної реакції (тоді r відноситься до етапу складної реакції), або у результаті послідовних перетворень (тоді r відноситься до чергового перетворення), або у результаті і того і іншого.

На основі матеріального балансу складають тепловий баланс, який відображає закон збереження енергії:

$$\sum Q_{\text{вх}} + \sum Q_{\text{витр}} = \sum Q_{\text{вих}}, \quad (12.4)$$

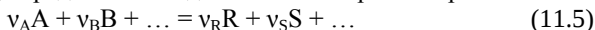
де $\sum Q_{\text{вх}}$ і $\sum Q_{\text{вих}}$ – теплота або енергія, відповідно, яка вноситься з реагентами і виноситься з продуктами, залишками сировини, включаючи втрати;

$\Sigma Q_{\text{вир}}$ – енергія джерел – теплота хімічних реакцій і фізичних процесів (випаровування, конденсація, розчинення і десорбція, стискання і розширення).

11.1. Матеріальний баланс

Зміна хімічного складу реагуючої суміші описується стехіометричним рівнянням, яке показує у яких співвідношеннях речовини вступають у реакцію і визначають кількісні зміни складу реакційної суміші.

Проста реакція буде представлена одним стехіометричним рівнянням:



Як прийнято, стехіометричні коефіцієнти v_A , v_B та інші вказують на кількість відповідних речовин, які вступають у реакцію. Співвідношення між кількостями перетворених речовин ΔN , також виражених у молях:

$$\frac{\Delta N_A}{v_A} = \frac{\Delta N_B}{v_B} = \dots = \frac{\Delta N_R}{v_R} = \frac{\Delta N_S}{v_S} \quad (11.6)$$

де ΔN_A , ΔN_B – кількості витрачених вихідних речовин А і В;

ΔN_R , ΔN_S – кількості утворених речовин R і S.

Використовують також зміну концентрації реагуючих речовин:

$$\frac{\Delta C_A}{v_A} = \frac{\Delta C_B}{v_B} = \dots = \frac{\Delta C_R}{v_R} = \frac{\Delta C_S}{v_S} \quad (11.7)$$

У таких випадках:

– реакція протікає у газовій фазі без зміни об'єму, концентрація виражена у молярних або об'ємних долях;

– реакція протікає у рідкій фазі, використовується молярна концентрація, наприклад моль/л.

Знаючи кількість однієї з речовин після хімічного перетворення, можна визначити кількості усіх компонентів суміші. Наприклад, якщо N_A – кількість речовини А, що залишилась, то:

$$N_i = N_{i0} \pm \left(\frac{v_i}{v_A} \right) \cdot (N_{A0} - N_A) \quad (11.8)$$

Якщо N_R – кількість продукту R після перетворення, то:

$$N_i = N_{i0} \pm \left(\frac{v_i}{v_R} \right) \cdot (N_{R0} - N_R) \quad (11.9)$$

Знак «+» використовують для продуктів реакції, знак «-» – для вихідних речовин.

Використовуючи ступінь перетворення речовини А (x_A) можна визначити кількість будь-якого компоненту:

$$x_A = \frac{N_{A0} - N_A}{N_{A0}} \quad (11.10)$$

$$N_i = N_{i0} \pm \left(\frac{v_i}{v_A} \right) \cdot (N_{A0} \cdot x_A) \quad (11.11)$$

Молярна доля компоненту у реакційній суміші визначається наступним чином:

$$C_i = \frac{N_i}{\sum N_i} = \frac{C_{i0} \pm \frac{v_i}{v_A} \cdot C_{A0} x_A}{1 + \frac{\Delta v}{v_A} \cdot C_{A0} x_A} \quad (11.12)$$

де Δv – зміна кількості молей речовини у реакції ($\Delta v > 0$ для реакції, у якій утворюється більше молей продукту, ніж у вихідних речовин).

Для реакції, яка протікає без зміни об'єму реакційної суміші:

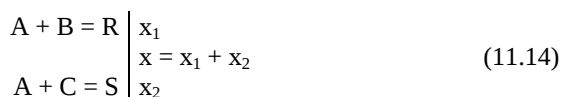
$$C_i = C_{i0} \pm \frac{v_i}{v_A} \cdot C_{A0} x_A \quad (11.13)$$

Знаючи кількість хоча б одного компоненту на виході із реактору або ступінь перетворення вихідного компоненту, можна визначити за рівняннями (11.8) – (11.13) стан вихідного потоку – кількості і концентрації усіх речовин.

Складна реакція буде представлена декількома стехіометричними рівняннями, подібними (11.5). Їх називають частками реакції. У складній реакції будь-яка з них приводить до утворення корисного продукту, наприклад R. Інші реакції – побічні, без утворення корисного продукту. Для більш простого викладення характеристик складної реакції її представляють системою стехіометричних рівнянь, у яких:

- ліва частина містить одну і ту ж вихідну речовину;
- права частина тільки одного рівняння містить корисний продукт.

Наприклад:



У кожне стехіометричне рівняння вводиться ступінь перетворення вихідної речовини. У прикладі наведені x_1 і x_2 – ступені перетворення речовини а у кожній реакції і загальна ступінь його перетворення.

Задаючи ступінь перетворення x_{Aj} вихідної речовини у кожному стехіометричному рівнянні, визначаємо кількість усіх компонентів рівною:

$$N_i = N_{i0} \pm \left(\sum_j^R \frac{v_{ij}}{v_{Aj}} \right) \cdot (N_{A0} \cdot x_{Aj}) \quad (11.15)$$

де v_{ij} – стехіометричний коефіцієнт і-ї речовини у j-й реакції.

Знаючи кількості компонентів N_i , розраховуємо їх молярні доли:

$$C_i = \frac{N_i}{\sum_{k=0}^B N_{k0}} \quad (11.16)$$

Для реакції, що протікає без зміни об'єму реакційної суміші:

$$C_i = C_{i0} \pm \sum_j^R \frac{v_{ij}}{v_{Aj}} \cdot C_{A0} x_{Aj} \quad (11.17)$$

Для складних реакцій вводяться наступні показники:

1. Вихід продукту – доля всієї кількості вихідної речовини, що перетворилась у продукт реакції. Якщо А – вихідна речовина, то ефективність процесу за продуктом R визначається наступним чином:

$$E_R = \frac{(N_R - N_{R0})}{N_{A0}} \cdot \frac{v_A}{v_R} \quad (11.18)$$

У прикладі (11.14) $E_R = x_1$ – вихід продукту R і ступінь перетворення речовини А у першій частці реакції співпадають.

2. Вибірковість за продуктом (селективність) – доля кількості вихідної речовини, що перетворилась у продукт. Якщо А – вихідна речовина, то вибірковість за продуктом R визначають так:

$$S_R = \frac{(N_R - N_{R0})}{N_{A0} - N_A} \cdot \frac{v_A}{v_R} \quad (11.19)$$

У прикладі (11.14) $S_R = x_1/x$.

Для простої реакції $S_R = 1$ і для будь-якого і-го продукту $E_i = x$. Для складної реакції $E_R = S_R x$.

Таким чином, задаючи ступінь перетворення x_{Aj} вихідної речовини А в усіх стехіометричних рівняннях складної реакції, можна визначити кількість N_i усіх компонентів у суміші, що прореагувала, їх концентрації C_i (молярні доли), парціальні тиски p_i (у газі), вихід продуктів E_i і селективність процесу за продуктами S_i :

$$N_i = N_{i0} \pm \sum_j^R v_{ij} \cdot N_{A0} \cdot x_{Aj}$$

$$C_i = \frac{N_i}{\sum_{k=1}^B N_k}$$

$$p_i = P \cdot C_i$$

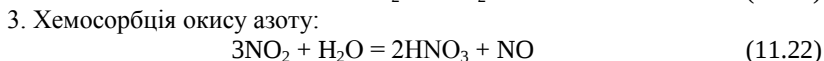
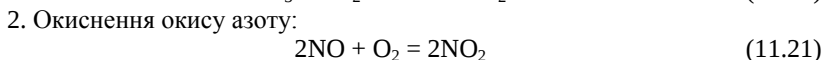
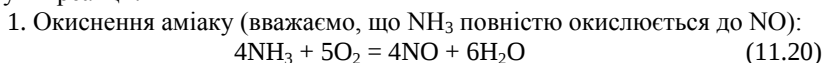
$$E_R = \frac{N_i}{N_{A0}}$$

$$S_R = \frac{\frac{N_i}{v_{il}}}{N_{A0} - N_A}$$

У цих формулах для простоти надання прийнято, що вихідна речовина А входить в усі стехіометричні рівняння зі стехіометричним коефіцієнтом $v_{Aj} = 1$. Продукти, для яких визначають селективність і вихід, утворюються тільки у l-му стехіометричному рівнянні і відсутні у вихідній суміші (для них $N_{i0} = 0$).

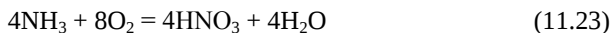
У ряді випадків необхідно скласти матеріальний баланс *підсистеми або хіміко-технологічної системи* у цілому, де протікає послідовно ряд перетворень.

Розглянемо приклад виробництва азотної кислоти, для якого потрібно скласти матеріальний баланс. У хіміко-технологічному процесі протікають наступні реакції:



У абсорбційну колону подається кисень і оксид азоту, що утворився, повторно окислюється до NO_2 за реакцією (11.21).

Таким чином утворення азотної кислоти представлено стехіометричними рівняннями (11.20)–(11.22). Помножимо перше з них на 1, друге на 3, а третє на 2 і складемо їх. Одержимо сумарне стехіометричне рівняння утворення азотної кислоти:



Звичайно, така хімічна реакція не відома, але це стехіометричне рівняння дозволить скласти матеріальний баланс по всьому виробництву азотної кислоти без деталізації перетворень по стадіям процесу.

Для балансових розрахунків може бути прийнято, що реакція протікає до моменту рівноваги. Тоді задається температура для такої рівноважної суміші. Таким чином, відома константа рівноваги K_p , яка пов'язана з рівноважними концентраціями речовин рівняннями рівноваги:

$$K_p = \left(\frac{C_R^{v_R} \cdot C_S^{v_S}}{C_A^{v_A} \cdot C_B^{v_B}} \right) \quad (11.24)$$

Використовуючи рівняння (11.16) і (11.17) можна визначити рівноважні концентрації усіх компонентів.

Результати розрахунку матеріального балансу записують у вигляді таблиці (табл. 11.1). Виходячи з умови збереження маси, у графі «ВСЬОГО», цифри повинні співпадати. Але якщо допущена помилка у розрахунках або

результати були округлені, то одержані результати можуть трохи відрізнятись. Таблиця теплового балансу має аналогічний вигляд.

Таблиця 11.1. – Матеріальний баланс

Прихід				Витрата			
Речовина	Кількість			Речовина	Кількість		
	кг	м ³	%		кг	м ³	%
А				А (залишок)			
В				В (залишок)			
С				Р			
				С			
ВСЬОГО				ВСЬОГО			

11.2. Тепловий баланс

Енергетичний (тепловий) баланс будь-якого апарату може бути представлений у вигляді рівняння, що зв'язує прихід і витрату енергії (тепла) процесу (апарату). Енергетичний баланс складається на основі закону збереження енергії, відповідно до якого у замкненій системі сума всіх видів енергії постійна.

Звичайно для хімічних процесів складається тепловий баланс. Рівняння теплового балансу:

$$\Sigma q_{\text{пр}} = \Sigma q_{\text{витр}} \quad (11.25)$$

або

$$\Sigma q_{\text{пр}} - \Sigma q_{\text{витр}} = 0 \quad (11.26)$$

Стосовно до теплового балансу закон збереження енергії формулюється у такий спосіб: прихід теплоти до даного апарату (або виробничому процесі) повинен бути рівним витраті теплоти у тому ж апараті (або процесі).

Для апаратів (процесів) безперервної дії тепловий баланс, як правило, складають на одиницю часу, а для апаратів (процесів) періодичної дії – на час циклу (або окремого переходу) обробки.

Тепловий баланс розраховують за даними матеріального балансу з обліком теплових ефектів (екзотермічних і ендотермічних) хімічних реакцій і фізичних перетворень (випаровування, конденсація і т.п.), що відбуваються у апараті з урахуванням підведення теплоти ззовні та відводу її з продуктами реакції, а також через стінки апарата.

Тепловий баланс подібно матеріальному виражають у вигляді таблиць, діаграм, а для розрахунків використовують наступне рівняння:

$$Q_{\text{г}} + Q_{\text{рід}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{р}} + Q_{\text{п}} = Q'_{\text{г}} + Q'_{\text{рід}} + Q'_{\text{г}} + Q'_{\text{ф}} + Q'_{\text{р}} + Q'_{\text{п}} \quad (11.27)$$

де $Q_{\text{г}}$, $Q_{\text{рід}}$, $Q_{\text{г}}$ – кількість теплоти, внесена у апарат твердими, рідкими і газоподібними речовинами відповідно;

$Q'_{\text{г}}$, $Q'_{\text{рід}}$, $Q'_{\text{г}}$ – кількість теплоти, відведена з апарату вихідними продуктами і напівпродуктами реакції, а також вихідними

речовинами у твердому, рідкому і газоподібному стані, що не прореагували;

Q_{ϕ} і Q'_{ϕ} – теплота фізичних процесів, що відбуваються з виділенням і поглинанням теплоти;

Q_p і Q'_p – кількість теплоти, що виділяється у результаті екзо– і ендотермічних реакцій (Q'_p);

Q_n – кількість теплоти, що підводиться у апарат ззовні (у вигляді димових газів, нагрітого повітря, спалювання палива, електроенергії і т.п.);

Q_n – втрати тепла у навколишнє середовище, а також відведення тепла через холодильники, розташовані усередині апарата.

Величини Q_t , $Q_{\text{рід}}$, Q_g , Q'_t , $Q'_{\text{рід}}$, Q'_g розраховують для кожної речовини, що надходить у апарат і виходить з нього, за формулою:

$$Q = G \cdot c \cdot t \quad (11.28)$$

де G – кількість речовини,

c – середня теплоємність цієї речовини;

t – температура, відлічена від будь-якої точки (звичайно від 0°C).

Теплоємності газів у Дж/(кмоль·К), що беруть участь у процесі, для даної температури у $^{\circ}\text{C}$ (або T , К) можна підрахувати, користуючись формулою:

$$C = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \quad (11.29)$$

Коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 – наведені у довідниках.

Найчастіше доводиться мати справу із сумішами речовин. Тому у формулу (11.28) підставляють теплоємність суміші $C_{\text{сум}}$, яка може бути обчислена за законом адитивності. Так, для суміші трьох речовин у кількості G_1 , G_2 і G_3 , що мають теплоємності c_1 , c_2 і c_3 :

$$C_{\text{сум}} = (G_1 c_1 + G_2 c_2 + G_3 c_3) / (G_1 + G_2 + G_3) \quad (11.30)$$

Сумарна теплота фізичних процесів, що відбуваються у апаратах, може бути розрахована за рівнянням:

$$Q_{\phi} = G_1 r_1 + G_2 r_2 + G_3 r_3 \quad (11.31)$$

де r_1 , r_2 і r_3 – теплота фазових переходів;

G_1 , G_2 і G_3 – кількості компонентів суміші, що перетерпіли фазові переходи у даному апараті.

Аналогічно розраховується витрата теплоти на ті фізичні процеси, які йдуть із поглинанням теплоти (Q'_{ϕ}): десорбція газів, пароутворення, плавлення, розчинення і т.п. Теплові ефекти хімічних реакцій можуть бути розраховані на основі теплоти утворення або теплоти згоряння речовин, що брали участь у реакції. Так, за законом Гесса тепловий ефект реакції визначається як різниця між теплою утворення всіх речовин у правій частині рівняння і теплою утворення всіх речовин, що входять у ліву частину рівняння.

Наприклад, для модельної реакції: $A + B = D + F + q_p$ ізобарний тепловий ефект буде виражений наступним чином:

$$\bar{q}_p = q_{\text{утв}} D + q_{\text{утв}} F - (q_{\text{утв}} A + q_{\text{утв}} B) \quad (11.32)$$

Ізобарні теплоти утворення з елементів різних речовин $\bar{q}_{утв}$ (або $-\Delta H_0$) наведені у довідниках фізико-хімічних, термохімічних або термодинамічних величин. При цьому у якості стандартних умов прийняті: температура 25°C , тиск $1,01 \cdot 10^5$ Па і для розчинених речовин концентрація 1 моль на 1 кг розчинника. Газі і розчини передбачаються ідеальними.

Кількість теплоти, яка виділяється або поглинається за протікання реакції, визначається тепловим ефектом реакції Q_p або зміною ентальпії реакції ΔH_p , причому $Q_p = -H_p$. Теплоту хімічної реакції розраховують виходячи з термохімічного рівняння, у якому Q_p є тепловим ефектом реакції:

$$v_A A + v_B B + \dots = v_R R + v_S S + \dots + Q_p \quad (11.33)$$

У літературі тепловий ефект Q_p відносять до стехіометрії реакції. Тоді загальна кількість теплоти, що виділяється у простій реакції дорівнює:

$$q_{\text{витр}} = Q_p \cdot \frac{N_{A0} - N_A}{v_A} = Q_p \cdot \frac{N_{B0} - N_B}{v_B} = Q_p \cdot \frac{N_{R0} - N_R}{v_R} = \dots = Q_p \cdot \frac{\Delta N_i}{v_i} \quad (11.34)$$

де ΔN_i – кількість вихідної речовини, що прореагувала, або утвореного продукту.

Якщо задана ступінь перетворення речовини А, то загальну кількість теплоти від хімічної реакції знаходять наступним чином:

– для простої реакції:

$$q_{\text{витр}} = \frac{Q_p}{v_A} \cdot N_{A0} \cdot x_A \quad (11.35)$$

– для складної реакції:

$$\sum q_{\text{витр}} = \sum \left[\frac{Q_{pj}}{v_{Aj}} \cdot N_{A0} \cdot x_{Aj} \right] \quad (11.36)$$

За протікання у системі фізичних процесів, які пов'язані з тепловими явищами (випаровування, конденсація, плавлення, сублімація, розчинення):

$$q_{\text{витр}} = \Delta G_i Q_{\text{фп}} \quad (11.37)$$

де ΔG_i – маса і-го компонента, який змінив свій фазовий стан;

$Q_{\text{фп}}$ – питома теплота фазового перетворення.

Зміна температури потоку внаслідок протікання хімічного перетворення визначається:

$$\Delta T = \frac{q_{\text{витр}}}{G \cdot c_p} \quad (11.38)$$

де G – маса потоку;

c_p – теплоємність потоку.

Тепловий ефект реакції також дорівнює сумі теплоти утворення вихідних речовин за винятком суми теплоти утворення продуктів реакції:

$$\Delta H = \sum (\Delta H_{\text{утв}})_{\text{вих}} - (\Delta H_{\text{утв}})_{\text{прод}} \quad (11.39)$$

Для визначення залежності теплового ефекту реакції від температури застосовується рівняння Нернста:

$$q_p = \bar{q}_p + \Delta a_0 T + -1/2 \Delta a_1 T^2 + -1/3 \Delta a_2 T^3 \quad (11.40)$$

де Δa_0 , Δa_1 , Δa_2 – різниці відповідних коефіцієнтів рівняння (12.29) для продуктів реакції та вихідних речовин. Значення цих коефіцієнтів для окремих реакцій наведені у довідниках.

Підведення теплоти у апарат Q_n можна враховувати по втраті кількості теплоти теплоносія, наприклад води, що гріє (G_v і c_v):

$$Q_n = G_v c_v (t_{\text{поч}} - t_{\text{кін}}) \quad (11.41)$$

пари:

$$Q_n = G_r \quad (11.42)$$

або ж за формулою теплопередачі через стінку, що гріє:

$$Q_n = k_r F (t_r - t_x) \tau \quad (11.43)$$

де k_r – коефіцієнт теплопередачі;

F – поверхня теплообміну;

t_r – середня температура речовини, що гріє (води, пари);

t_x – середня температура речовини, що нагрівається, у апараті;

g – теплота випаровування;

τ – час.

По цій і інших формулах теплопередачі можна також розрахувати відведення теплоти від реагуючої суміші у апарат або втрату теплоти у навколишнє середовище Q'_n . Цю статтю витрат теплоти часто обчислюють по зміні кількості теплоти холодоагенту, наприклад води, що охолоджує, або повітря.

Теплоту, одержувану при спалюванні палива або при перетворенні електричної енергії у теплову, розраховують за формулами:

– для полум'яних печей:

$$Q_n = B Q_n^p \quad (11.44)$$

– для електричних печей:

$$Q_n = N \beta \quad (11.45)$$

де B – витрата палива, $\text{м}^3/\text{с}$ або $\text{кг}/\text{с}$;

Q_n^p – нижча теплота згоряння палива, $\text{дж}/\text{м}^3$ або $\text{Дж}/\text{кг}$;

N – потужність печі, Вт ;

β – розмірний коефіцієнт.

При визначенні теплоти згоряння палива по його елементарному складу у технічних розрахунках найчастіше використовують формулу Менделєєва:

$$Q_n^p = 339,3C + 1256H - 109(O - S) - 25,2(9H + W) \quad (11.46)$$

де C , H , O , S – відповідно зміст вуглецю, водню, кисню і сірки, % мас.;

W – вміст води у робочому паливі (з обліком вмісту в ньому $A\%$ золи, $N\%$ азоту), % мас.

Вища теплота згоряння Q_v^p обчислюється за умови, що вся вода, яка утворювалася при згорянні, волога, яка спочатку містилась у паливі, конденсується з газів, що відходять, у рідину і охолоджується до первісної

температури, з якої надходить паливо у топку. Визначається Q_n^p за формулою:

$$Q_b^p = Q_n^p + 25,2 (9H + W) \quad (11.47)$$

На основі елементарного складу палива, теоретична витрата повітря G (у кг на 1 кг палива) розраховується за рівнянням:

$$G_{\text{теор}} = 0,116c + 0,348H + 0,0135(S - O) \quad (11.48)$$

Кількість тепла, внесеного вологим повітрям, $I_{\text{пов}}$, можна підрахувати за формулою:

$$I_{\text{пов}} = \alpha G_{\text{теор}} (1,02 + 1,95x) t_{\text{пов}} \quad (11.49)$$

де $G_{\text{теор}}$ – теоретична витрата повітря (у кг), що іде на спалювання 1 кг робочого палива;

α – коефіцієнт надлишку повітря (практично для твердого палива α береться від 1,3 до 1,7);

1,02 – питома теплоємність повітря;

1,95 – питома теплоємність водяної пари;

x – вологоємність повітря (у кг) на 1 кг сухого повітря;

$t_{\text{пов}}$ – температура повітря, що надходить на згорання.

11.3. Приклади для розрахунків

Приклад 1. Скласти матеріальний баланс процесу спалювання сірки у печі потужністю 2500 кг/год. Ступінь окиснення сірки складає 95%. Коефіцієнт надлишку повітря – 1,5. Розрахунок вести у кг/год та м³/год.

Розв'язання.

Процес спалювання описується рівнянням: $S + O_2 \rightarrow SO_2$.

Маса сірки визначається:

– окиснена до SO_2 : $G_S^{\text{ок}} = 2500 \cdot 0,95 = 2375$ кг/год.

– не окисненої: $G_S^{\text{нок}} = 2500(1-0,95) = 125$ кг/год.

Витрачено кисню:

– на окиснення: $G_{O_2} = G_S^{\text{ок}} \cdot 22,4/M_S = 1663$ м³/год.

– з урахуванням надлишку: $G_{O_2}^{\text{н}} = G_{O_2} \cdot \alpha = 2495$ м³/год або 3564 кг/год.

Потрапило азоту з киснем:

$G_{N_2} = G_{O_2}^{\text{н}} \cdot 79/21 = 9386$ м³/год або 11700 кг/год.

Утворилось SO_2 за реакцією:

$G_{SO_2} = G_S^{\text{ок}} \cdot M_{SO_2}/M_S = 4250$ кг/год або 1663 м³/год.

Залишилось невитраченого кисню:

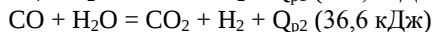
$G_{O_2}^{\text{нев}} = G_{O_2}(\alpha-1) = 832$ м³/год або 1189 кг/год.

Результати розрахунків зводять у таблицю:

Прихід				Витрата			
Речовина	Кількість			Речовина	Кількість		
	кг	м ³	%		кг	м ³	%
Сірка	2500	–		Сірка	125	–	
Повітря: кисень	3564	2495		Повітря: кисень	1189	832	

азот	11700	9380		азот	11700	9380	
				Двоокис сірки	4750	1663	
ВСЬОГО	17764	11875	100	ВСЬОГО	17764	11875	100

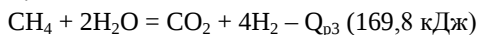
Приклад 2. Складіть матеріальний баланс та знайдіть кількість підведеного тепла у процесі одержання водню конверсією метану водяною парою, що описується реакціями:



Кількість пари води у кіломолях поступає у 6 разів більше, ніж метану, ступінь перетворення метану 98 %, вихід окису вуглецю – 96%. Розрахунок вести на $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ водню.

Розв'язання.

У даній системі стехіометричних рівнянь обидва рівняння є незалежними ($Y = 5 - 3 = 2$). Але для полегшення розрахунків корисно другу реакцію замінити загальною реакцією, яку одержують сумациєю двох попередніх рівнянь:



Перша та третя реакція також представляють собою систему незалежних рівнянь, у якій перетворення метану протікає за двома напрямками зі ступенями перетворення x_1 і x_2 . Ступінь перетворення x_1 відповідає виходу окису вуглецю, ступінь перетворення x_2 може бути визначена як різниця між загальним перетворенням метану x і x_1 . Знаходимо $x_2 = 0,02$. Знаючи ступені перетворення, можна розраховувати кількості реагуючих речовин.

Вихідна кількість метану:

$$V_{\text{CH}_4} = V_{\text{H}_2} / (3x_1 + 4x_2) = 1000 / (2,88 + 0,08) = 337,8 \text{ м}^3/\text{год} \text{ або } 241 \text{ кг/год.}$$

Вихідна кількість водяної пари:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 6 \cdot V_{\text{CH}_4} = 2026,8 \text{ м}^3/\text{год} \text{ або } 1628,7 \text{ кг/год.}$$

Кількість одержаного моно оксиду вуглецю:

$$V_{\text{CO}} = V_{\text{CH}_4} \cdot x_1 = 324,3 \text{ м}^3/\text{год} \text{ або } 405,4 \text{ кг/год.}$$

Кількість одержаного двоокису вуглецю:

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{CH}_4} \cdot x_2 = 6,8 \text{ м}^3/\text{год} \text{ або } 13,3 \text{ кг/год.}$$

Кількість водяної пари, що залишилась:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} - V_{\text{CH}_4} \cdot (x_1 + 2x_2) = 2026,8 - 337,8(0,96 - 0,04) = 1689 \text{ м}^3/\text{год} \text{ або } 1869,8 \text{ кг/год.}$$

Кількість підведеної теплоти у процес знаходять наступним чином:

$$\begin{aligned} \sum Q_{\text{вир}} &= Q_{p1} \cdot V_{\text{CH}_4} \cdot x_1 \cdot 10^3 / (22,4 \cdot 3600) + \\ &+ Q_{p2} \cdot V_{\text{CH}_4} \cdot x_2 \cdot 10^3 / (22,4 \cdot 3600) = -826,96 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

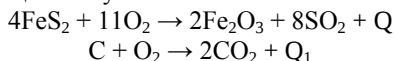
Результати розрахунків зводять у таблицю:

Прихід				Витрата			
Речовина	Кількість			Речовина	Кількість		
	кг	м ³	%		кг	м ³	%
CH ₄	241.3	337.8		H ₂	89.3	1000.0	

H ₂ O	1628,7	2026,8		CO	405,4	324,3	
				CO ₂	13,3	6,8	
				CH ₄	4,8	6,8	
				H ₂ O	1367	16890	
ВСЬОГО	1870,0	2364,6	100	ВСЬОГО	1869,8	3026,9	100

Похибка розрахунків складає – 0,01%, що є допустимим.

Приклад 3. Визначити теоретичну теплотворну здатність вуглецевого колчедану, що містить 45% сірки і 5% вуглецю, знаючи, що 1 кг чистого колчедану при згорянні дає 7060 кДж/кг, а 1 кг чистого вуглецю – 32700 кДж/кг. Рівняння реакцій наступні:



Розв'язання.

Чистий колчедан (пірит) містить $64 \cdot 100 / 120 = 53,35\%$ S (120 – молярна маса FeS₂).

Отже, розглянута руда містить:

– колчедан $45 / 53,35 = 0,842$ кг,

– вуглець 0,05 кг,

– порожня порода 0,108 кг.

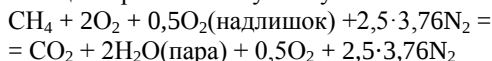
Разом: 1 кг.

$$Q = 7060 \cdot 0,842 + 32700 \cdot 0,05 = 5940 + 1635 = 7575 \text{ кДж/кг}$$

Приклад 4. Розрахувати теоретичну температуру горіння метану природного газу (теплота згоряння 890319 кДж/моль) при надлишку повітря 25% ($\alpha = 1,25$).

Розв'язання.

Реакція горіння метану наступна:



За початкової температури метану і повітря, рівної 0⁰С, і заданої температури горіння, тепловий баланс виражається наступним рівнянням:

$$Q = 890310 = (c(\text{CO}_2) + 2c(\text{H}_2\text{O}) + 0,5c(\text{O}_2) + 2,5 \cdot 3,76c(\text{N}_2)) \cdot t$$

Середня мольна теплоємність газів і пари с, кДж/(кмоль·град):

Речовина	1800 ⁰ С	1900 ⁰ С
O ₂	34,9	35,1
CO ₂	53,9	54,2
N ₂	33,1	33,2
H ₂ O(пара)	42,8	43,2

Отже, за 1800⁰С:

$$Q' = (53,9 + 2 \cdot 42,8 + 0,5 \cdot 34,9 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 33,1) \cdot 1800 = 842000 \text{ кДж}$$

$$Q' = 842000 \text{ кДж} < Q = 890310 \text{ кДж}$$

За 1900⁰С:

$$Q'' = (54,2 + 2 \cdot 43,2 + 0,5 \cdot 35,1 + 2,5 \cdot 3,76 \cdot 33,2) \cdot 1900 = 906000 \text{ кДж}$$

$$Q'' = 906000 \text{ кДж} > Q = 890310 \text{ кДж}$$

$$\Delta t_1 = 1900 - 18800 = 100^\circ\text{C}$$

$$Q'' - Q = 906000 - 890310 = 15690 \text{ кДж}$$

$$Q - Q' = 890310 - 842000 = 58310 \text{ кДж}$$

$$\Delta t = t - 1800$$

$$\Delta t = 15690 \cdot 100 / 58310 = 26,8^\circ\text{C}$$

$$t = 1800 + 26,8 = 1826,8^\circ\text{C}.$$

Приклад 5. Розрахувати тепловий баланс контактного апарата для часткового окиснення SO_2 продуктивністю $25000 \text{ м}^3/\text{год}$, якщо склад газової суміші: SO_2 – 9% (об.), O_2 – 11% (об.), N_2 – 80% (об.). Ступінь окиснення 88%. Температура вхідного газу 460°C ; вихідного – 580°C . Середня теплоємність суміші (умовно вважаємо її незмінною) $c = 2,052 \text{ кДж}/(\text{м}^3/\text{град})$. Втрати тепла у навколишнє середовище приймаємо рівними 5% від приходу теплоти.

Розв'язання.

Рівняння реакції наступне:



Склад газу наведений у таблиці:

Вихідний		Після апарату		
газ	м^3	газ	м^3	
SO_2	2250	SO_2	2250-(2250·0,88)	
SO_3	–	SO_3	2250·0,88	
N_2	20000	N_2	20000	
O_2	2750	O_2	2750-(1980/2)	
Всього	25000	Всього	270+1980+20000+1760	
			24010	

Прихід теплоти. Фізична теплота газу:

$$Q_1 = 25000 \cdot 2,052 \cdot 460 = 23598000 \text{ кДж}$$

Теплоти реакції:

$$Q_2 = 94207 \cdot (22650/22,4) \cdot 0,83 = 8290216 \text{ кДж}$$

$$\text{Усього } \Sigma q_{\text{пр}} = 31888216 \text{ кДж}$$

Витрата теплоти. Теплота, винесена газами, що відходять:

$$Q_3 = 24010 \cdot 2,052 \cdot 580 = 28564000 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{витр}} = 31888 \cdot 10^3 \cdot 0,05 = 1594400 \text{ кДж}$$

$$\text{Усього } \Sigma q_{\text{витр}} = 30158400 \text{ кДж}$$

Отже, необхідно відвести теплоти:

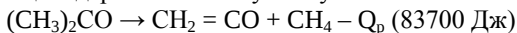
$$\Sigma q_{\text{відв}} - \Sigma q_{\text{витр}} = 31888216 - 30158400 = 1729816 \text{ кДж}$$

Дані теплового балансу зведені в таблицю:

Прихід			Витрата		
Дані	кДж	%	Дані	кДж	%
Q_1	23598000	73,9	Q_3	28564000	89,6
Q_2	8290216	26,1	$Q_{\text{витр}}$	1594400	5,0
			$Q_{\text{відв}}$	1729816	5,0
Всього	31888216	100	Всього	31888216	100

Приклад 6. Скласти тепловий баланс виробництва кетону піролізом ацетону і розрахувати кількість теплоти – природного газу (98 об'ємних долей метану, % та 2 об'ємні долі азоту, %), необхідного для підтримки теплового режиму процесу. Потужність по кетону 1000 кг/год, температура піролізу 800°C, ступінь перетворення ацетону у кетон 25%. Втрати теплоти не враховуємо.

Хімічна реакція одержання кетону наступна:



Ацетон поступає у процес у рідкому вигляді за температури 20°C. Теплота випаровування ацетону складає $Q_{\text{випр}} = 553,5 \text{ кДж/кг}$, питома теплоємність ацетону за температури 20°C складає $c_p = 2,26 \text{ кДж/(кг·град)}$, теплоємність реакційної суміші $c_p^{\text{см}} = 2,26 \text{ кДж/(кг·град)}$ за температури 800°C, теплотворна здатність метану складає $Q_t = 890 \text{ МДж/кмоль}$. Молекулярні маси: ацетону – 58, кетону – 42.

Розв'язання.

З урахуванням ступеню перетворення кількість ацетону, що вступив у процес дорівнює: $G_{\text{ац}} = M_{\text{ац}} \cdot 1000 / (M_{\text{кет}} \cdot x) = 5523,8 \text{ кг/год}$.

Прихід теплоти з потоком рідкого ацетону:

$$Q_{\text{вх}} = G_{\text{ац}} \cdot c_p \cdot t_{\text{вх}} = 231 \cdot 10^3 \text{ кДж/год.}$$

Витрата теплоти:

– на випаровування ацетону:

$$Q_{\text{випар}} = G_{\text{ац}} \cdot Q_{\text{випр}} = 3057 \cdot 10^3 \text{ кДж/год.}$$

– з газами, що відходять:

$$Q_{\text{вих}} = G_{\text{ац}} \cdot c_p \cdot t_p = 9987 \cdot 10^3 \text{ кДж/год.}$$

– у ендотермічній реакції:

$$Q_{\text{витр}} = G_{\text{ац}} \cdot Q_p \cdot 10^3 / M_{\text{ац}} = 20 \cdot 10^3 \text{ кДж/год.}$$

Сумарний вихід теплоти складає $13064 \cdot 10^3 \text{ кДж/год}$.

Дефіцит теплоти – $Q_{\text{деф}} = 12833 \cdot 10^3 \text{ кДж/год}$.

Кількість природного газу, необхідна для спалювання у зоні реакції:

$$N_{\text{CH}_4} = Q_{\text{деф}} / Q_t = 14,4 \text{ кмоль/год}$$

Або у перерахунку на природний газ:

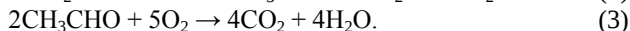
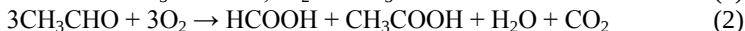
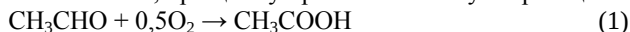
$$V = N_{\text{CH}_4} \cdot 22,4 / 0,98 = 329 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Дані теплового балансу зведені в таблицю:

Прихід			Витрата		
Дані	кДж	%	Дані	кДж	%
З рідким ацетоном	$231 \cdot 10^3$	1,76	Випаровування ацетону	$3057 \cdot 10^3$	23,4
Теплота згоряння природного газу	$12433 \cdot 10^3$	98,24	З газами, що відходять	$9987 \cdot 10^3$	76,5
			Хімічна реакція	$20 \cdot 10^3$	0,1
Всього	$13064 \cdot 10^3$	100	Всього	$13057 \cdot 10^3$	100

Похибка розрахунку складає – 0,05%, що є допустимим.

Приклад 7. Скласти матеріальний баланс виробництва оцтової кислоти окисненням ацетальдегіду киснем повітря і розрахувати технологічні показники виробництва. Процес окиснення ацетальдегіду в оцтову кислоту здійснюється у апараті колонного типу за температури 70–75⁰С у присутності солей і металів змінної валентності, при цьому протікають наступні реакції:



Виробництво оцтової кислоти окисненням ацетальдегіду може бути організоване за схемою:

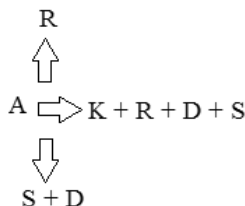
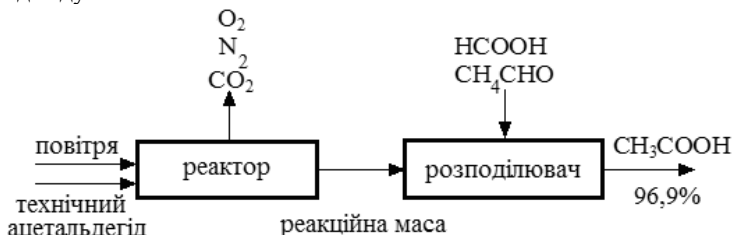


Схема матеріальних потоків у виробництві оцтової кислоти окисненням ацетальдегіду:



Молекулярні маси компонентів реакційної суміші: $M_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 44$ г/моль; $M_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 60$ г/моль; $M_{\text{CO}_2} = 44$ г/моль; $M_{\text{HCOOH}} = 46$ г/моль; $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$ г/моль.

Вихідні дані:

1. Потужність установки за льодяною оцтовою кислотою 96,9%-ї концентрації, кг/год	1500,0
2. Склад вихідного ацетальдегіду, %:	
– ацетальдегід	99,0
– оцтова кислота	0,5
– вода	0,5
3. Склад реакційної маси, %:	
– оцтова кислота	94,0
– ацетальдегід	2,0
– мурашина кислота	1,0
– вода	3,0
4. Надлишок повітря відносно до витраченого у реакціях (1)–(3)	1,3

Розв'язання.

1. Визначаємо склад оцтової кислоти і реакційної маси:

Склад оцтової кислоти, кг/год:	
– оцтова кислота	1453,50
– вода	46,50
Всього	1500,00
Склад реакційної маси, кг/год:	
– оцтова кислота	1453,50
– ацетальдегід	30,92
– мурашина кислота	15,46
– вода	46,50
Всього	1546,38

2. Виходячи з вмісту мурашиної кислоти у реакційній масі, розраховуємо кількість кожного компоненту, який бере участь у реакції (2):

– ацетальдегіду:

$$\frac{G_K \cdot v_A \cdot M_A}{v_K \cdot M_K} = \frac{15,46 \cdot 3 \cdot 44}{1 \cdot 46} = 44,36 \text{ кг/год};$$

– оцтової кислоти:

$$\frac{G_K \cdot v_R \cdot M_R}{v_K \cdot M_K} = \frac{15,46 \cdot 2 \cdot 60}{1 \cdot 46} = 40,33 \text{ кг/год};$$

– води:

$$\frac{G_K \cdot v_D \cdot M_D}{v_K \cdot M_K} = \frac{15,46 \cdot 1 \cdot 18}{1 \cdot 46} = 6,05 \text{ кг/год};$$

– оксиду вуглецю:

$$\frac{G_K \cdot v_S \cdot M_S}{v_K \cdot M_K} = \frac{15,46 \cdot 1 \cdot 44}{1 \cdot 46} = 14,78 \text{ кг/год}.$$

3. Складемо рівняння матеріального балансу за компонентами суміші, кг/год:

– за оцтовою кислотою:

$$G \cdot 0,005 + R^1 + R^2 = R_1;$$

– за ацетальдегідом;

$$G \cdot 0,99 - A^1 - A^2 - A^3 = A_1;$$

– за водою:

$$G \cdot 0,005 + D^2 + D^3 = D_1.$$

G, R^1, A^3 і D^3 – невідомі, але згідно реакціям (2) і (3) можна записати як:

$$A^1 = \frac{R^1 \cdot v_A \cdot M_A}{v_R \cdot M_R} = \frac{R^1 \cdot 1 \cdot 44}{1 \cdot 60} = \frac{44}{60} R^1;$$

$$D^3 = \frac{A^3 \cdot v_D \cdot M_D}{v_A \cdot M_A} = \frac{A^3 \cdot 4 \cdot 19}{2 \cdot 44} = \frac{76}{88} A^3,$$

де G – загальна кількість технічного ацетальдегіду;

A_1, R_1, D_1 – вміст відповідних компонентів у реакційній суміші;

A^1, A^2, A^3 – кількість ацетальдегіду, який прореагував відповідно реакцій (1), (2) і (3);

R^1, R^2 – кількість оцтової кислоти, яка одержана відповідно до реакцій (1) і (2);

D^2, D^3 – кількість води, яка одержана відповідно до реакцій (2) і (3).

Таким чином, маємо три рівняння і три невідомих.

Розв'язуючи систему рівнянь матеріального балансу знаходимо:

$G = 1160,63$ кг/год; $R^1 = 1407,35$ кг/год; $A^3 = 41,69$ кг/год; $D^3 = 36$ кг/год.

Відповідно до стехіометричного рівняння реакції (1) розраховуємо кількість ацетальдегіду, що прореагував:

$$A^1 = \frac{R^1 \cdot v_A \cdot M_D}{v_R \cdot M_R} = \frac{1407,35 \cdot 1 \cdot 44}{1 \cdot 60} = 1032,05 \text{ кг/год.}$$

Розраховуємо кількість двоокису вуглецю, який утворився за реакцією (3):

$$\frac{A^3 \cdot v_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2}}{v_A \cdot M_A} = \frac{41,69 \cdot 4 \cdot 44}{2 \cdot 44} = 83,38 \text{ кг/год.}$$

Визначаємо загальну кількість ацетальдегіду, що прореагував:

$A^1 + A^2 + A^3 = 1032,05 + 44,36 + 41,69 = 1118,1$ кг/год.

Розраховуємо кількість ацетальдегіду, що не прореагував:

$A_1 = G \cdot 0,99 - 1118,1 = 1149,02 - 1118,1 = 30,92$ кг/год.

Відповідно стехіометричних рівнянь реакцій (1), (2) і (3) знаходимо кількість витраченого кисню:

– за реакцією (1):

$$\frac{A^1 \cdot v_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2}}{v_A \cdot M_A} = \frac{1032,05 \cdot 0,5 \cdot 32}{1 \cdot 44} = 375,29 \text{ кг/год;}$$

– за реакцією (2):

$$\frac{A^2 \cdot v_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2}}{v_A \cdot M_A} = \frac{44,36 \cdot 3 \cdot 32}{3 \cdot 44} = 32,26 \text{ кг/год;}$$

– за реакцією (3):

$$\frac{A^3 \cdot v_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2}}{v_A \cdot M_A} = \frac{41,69 \cdot 5 \cdot 32}{2 \cdot 44} = 75,8 \text{ кг/год}$$

Загальна кількість кисню, який був витрачений за усіма реакціями, кг/год:

$375,29 + 32,26 + 75,8 = 483,35$.

Кисень з урахуванням надлишку, кг/год:

$483,35 \cdot 1,3 = 628,35$.

Кількість кисню, яка не прореагувала, кг/год:

$628,35 - 483,35 = 145$.

Кількість повітря, яка подається у реактор, кг/год:

$483,35/0,233 = 2074,46$.

де 0,233 – масовий вміст кисню у повітрі.

Повітря з обліком надлишку, кг/год:

$$2074,46 \cdot 1,3 = 2696,8.$$

Склад газів, що відходять, кг/год:

– кисень – 145;

– азот – 2696,8 – 628,35 = 2068,45;

– двоокис вуглецю, що утворився за реакціями (2) і (3) – 14,78 + 83,38 = 98,16 кг/год.

Технологічні показники виробництва:

Вихід оцтової кислоти за технічним ацетальдегідом:	
Теоретичний, кг/год	$1160,63 \cdot 60/44 = 1582,68$
Фактичний, %	$1453,5 \cdot 100/1582,68 = 91,83$
Вихід оцтової кислоти на перетворений ацетальдегід:	
Теоретичний, кг/год	$1118,1 \cdot 60/44 = 1524,68$
Фактичний, %	$1453,5 \cdot 100/1524,68 = 95,33$
Витратні коефіцієнти за ацетальдегідом, кг/кг:	
Теоретичний	$44/60 = 0,73$
Фактичний	$1149,02/1453,5 = 0,79$
Витратні коефіцієнти за повітрям, кг/год:	
Теоретичний	$16/(60 \cdot 0,23) = 1,16$
Фактичний	$2696,78/1453,5 = 1,85$

Дані розрахунку зводимо у таблицю. Похибка розрахунків є допустимою.

Матеріальний баланс виробництва оцтової кислоти:

Прихід				Витрата			
Речовина	Кількість			Речовина	Кількість		
	кг/год	м ³ /год	%		кг/год	м ³ /год	%
Технічний ацетальдег., у т. ч.: – ацетальдегід; – вода.	1160,63			Оцтова кислота (96,9%)	1500		
	1149,02						
	5,80						
Повітря, у т. ч.: – кисень; – азот.	2696,78	60408		Ацетальдег.	30,92		
	628,35	14075	21	Мурашина кислота	15,46		
	2068,43	46333	79	Гази, що відходять, у т. ч.:	2311,69	51780	
				– кисень;	145,00	3248	6,3
				– азот;	2068,43	46333	89,5
				– двоокис вуглецю.	98,16	2199	4,2
Всього	3857,41	60408	100	Всього	3858,07	51780	100

11.4. Питання для самоконтролю

1. Що таке хіміко-технологічна система (ХТС)?
2. У чому сутність системного аналізу при вивченні і розробці хіміко-технологічних систем? Сформулюйте поняття системи і вкажіть, які ознаки дозволяють розглядати хімічне виробництво як складну систему.
3. Яку роль виконує аналіз хіміко-технологічної системи у загальній задачі розробки хімічних виробництв? Як формулюється задача аналізу хіміко-технологічної системи, як аналіз пов'язаний з іншими етапами складання хіміко-технологічної системи?
4. Дайте характеристику ролі та задачі розробки хімічних виробництв, зв'язок їх з іншими етапами розробки хіміко-технологічної системи. Назвіть найбільш розповсюджені у хімічній технології методи синтезу хіміко-технологічної системи.
5. Як зображують структурну і операторну схему хіміко-технологічної системи?
6. Які типи технологічних зв'язків існують між елементами хіміко-технологічних систем?
7. Який ефект дає послідовне з'єднання реакторів витиснення; реакторів змішування? У яких випадках у хімічних виробництвах доцільно застосовувати послідовне з'єднання апаратів?
8. Що дає паралельне з'єднання реакторів витиснення; змішування? Коли його застосовують?
9. У яких випадках доцільно у хімічних виробництвах використовувати схеми з рециклом? Який ефект дає застосування рециклів?
10. Який зв'язок існує між ступенем рециркуляції та коефіцієнтом рециркуляції?
11. У яких випадках у хімічній технології доцільно застосування схем з байпасами?
12. У чому полягає сутність проблем, що виникають при розробці та експлуатації агрегатів великої одиничної потужності?
13. За якими ознаками класифікують сировину хімічної промисловості?
14. Що таке вторинні матеріальні ресурси?
15. З якою метою проводиться комплексна переробка сировини?
16. Що таке збагачення сировини і навіщо його застосовують?
17. З якою метою використовується у хімічній технології вода і повітря?
18. За якими показниками визначають якість води?
19. Складіть схему очищення природної води.
20. Яка роль палива та енергії у проведенні технологічних процесів?
21. Що таке вторинні енергетичні ресурси? Як їх класифікують по виду енергії?
22. У чому полягає сутність енерготехнології?

23. Приведіть приклади використання в енерготехнологічних схемах теплоти хімічних реакцій.
24. Яка роль палива і енергії у проведенні технологічних процесів?
25. Які основні види енергетичних ресурсів? Які з них є найбільш перспективними?
26. Перелічіть поновлювані та не поновлювані енергетичні ресурси.
27. Яка роль вторинних енергетичних ресурсів у економії палива та енергії?
28. Які способи застосовують для ефективного використання вторинних енергетичних ресурсів, у тому числі і для одержання холоду?
29. Наведіть приклади використання в енерготехнологічних схемах теплоти хімічних реакцій.
30. Сформулюйте основні напрямки підвищення ефективності використання сировинних і паливно-енергетичних ресурсів.

11.5. Тестові питання

1. Система – це:

а) об'єкт, взаємодіючий із зовнішнім середовищем, що володіє складною внутрішньою будовою, більшим числом складових частин і елементів (апаратів), взаємозалежних технологічними потоками (зв'язками) і діючих як єдине ціле;

б) самостійна і умовно неподільна одиниця. У хімічній технології це найчастіше апарат, у якому протікає будь-який типовий процес (хімічний, дифузійний, тепловий і т.п.);

в) група елементів (апаратів), що володіє певною цілісністю і доцільністю;

г) характер і порядок з'єднання окремих апаратів у технологічній схемі.

2. Технологічна топологія – це:

а) об'єкт, взаємодіючий із зовнішнім середовищем, що володіє складною внутрішньою будовою, більшим числом складових частин і елементів (апаратів), взаємозалежних технологічними потоками (зв'язками) і діючих як єдине ціле;

б) самостійна і умовно неподільна одиниця. У хімічній технології це найчастіше апарат, у якому протікає будь-який типовий процес (хімічний, дифузійний, тепловий і т.п.);

в) група елементів (апаратів), що володіє певною цілісністю і доцільністю;

г) характер і порядок з'єднання окремих апаратів у технологічній схемі.

3. Елемент – це:

а) об'єкт, взаємодіючий із зовнішнім середовищем, що володіє складною внутрішньою будовою, більшим числом складових частин і елементів

(апаратів), взаємозалежних технологічними потоками (зв'язками) і діючих як єдине ціле;

б) самостійна і умовно неподільна одиниця. У хімічній технології це найчастіше апарат, у якому протікає будь-який типовий процес (хімічний, дифузійний, тепловий і т.п.);

в) група елементів (апаратів), що володіє певною цілісністю і доцільністю;

г) характер і порядок з'єднання окремих апаратів у технологічній схемі.

4. Підсистема – це:

а) об'єкт, взаємодіючий із зовнішнім середовищем, що володіє складною внутрішньою будовою, більшим числом складових частин і елементів (апаратів), взаємозалежних технологічними потоками (зв'язками) і діючих як єдине ціле;

б) самостійна і умовно неподільна одиниця. У хімічній технології це найчастіше апарат, у якому протікає будь-який типовий процес (хімічний, дифузійний, тепловий і т.п.);

в) група елементів (апаратів), що володіє певною цілісністю і доцільністю;

г) характер і порядок з'єднання окремих апаратів у технологічній схемі.

5. Завдання синтезу ХТС полягає:

а) у розрахунках повної математичної моделі ХТС на основі математичних моделей окремих елементів і технологічної топології з метою визначення параметрів вихідних технологічних потоків при заданих технологічних умовах і параметрах вхідних потоків;

б) у створенні ХТС, що працює з високою ефективністю;

в) у знаходженні екстремального значення обраного критерію ефективності функціонування ХТС.

6. Завдання аналізу ХТС полягає:

а) у розрахунках повної математичної моделі ХТС на основі математичних моделей окремих елементів і технологічної топології з метою визначення параметрів вихідних технологічних потоків при заданих технологічних умовах і параметрах вхідних потоків;

б) у створенні ХТС, що працює з високою ефективністю;

в) у знаходженні екстремального значення обраного критерію ефективності функціонування ХТС.

7. Завдання оптимізації ХТС полягає:

а) у розрахунках повної математичної моделі ХТС на основі математичних моделей окремих елементів і технологічної топології з метою визначення параметрів вихідних технологічних потоків при заданих технологічних умовах і параметрах вхідних потоків;

- б) у створенні ХТС, що працює з високою ефективністю;
- в) у знаходженні екстремального значення обраного критерію ефективності функціонування ХТС.

8. Функціональна схема дає:

- а) загальне уявлення про процес функціонування ХТС. На схемі виділяються основні вузли (підсистеми), що виконують певну технологічну операцію, показані технологічні зв'язки між ними;
- б) зображення всіх елементів ХТС у вигляді блоків, що мають кілька входів і виходів, показує технологічні зв'язки між блоками;
- в) наочність уявлення про фізико-хімічну сутність технологічних процесів системи;
- г) зображення кожного елемента процесу у вигляді умовного стандартного загальноприйнятого зображення, технологічні зв'язки показані спрямованими лініями зі стрілками.

9. Операторна схема дає:

- а) загальна вистава про процес функціонування ХТС. На схемі виділяються а) загальне уявлення про процес функціонування ХТС. На схемі виділяються основні вузли (підсистеми), що виконують певну технологічну операцію, показані технологічні зв'язки між ними;
- б) зображення всіх елементів ХТС у вигляді блоків, що мають кілька входів і виходів, показує технологічні зв'язки між блоками;
- в) наочність уявлення про фізико-хімічну сутність технологічних процесів системи;
- г) зображення кожного елемента процесу у вигляді умовного стандартного загальноприйнятого зображення, технологічні зв'язки показані спрямованими лініями зі стрілками.

10. Структурна схема дає:

- а) загальне уявлення про процес функціонування ХТС. На схемі виділяються основні вузли (підсистеми), що виконують певну технологічну операцію, показані технологічні зв'язки між ними;
- б) зображення всіх елементів ХТС у вигляді блоків, що мають кілька входів і виходів, показує технологічні зв'язки між блоками;
- в) наочність уявлення про фізико-хімічну сутність технологічних процесів системи;
- г) зображення кожного елемента процесу у вигляді умовного стандартного загальноприйнятого зображення, технологічні зв'язки показані спрямованими лініями зі стрілками.

11. Технологічна схема дає:

а) загальне уявлення про процес функціонування ХТС. На схемі виділяються основні вузли (підсистеми), що виконують певну технологічну операцію, показані технологічні зв'язки між ними;

б) зображення всіх елементів ХТС у вигляді блоків, що мають кілька входів і виходів, показує технологічні зв'язки між блоками;

в) наочність уявлення про фізико-хімічну сутність технологічних процесів системи;

г) зображення кожного елемента процесу у вигляді умовного стандартного загальноприйнятого зображення, технологічні зв'язки показані спрямованими лініями зі стрілками.

12. За функціональною схемою:

а) можна визначити, які операції відбуваються у виробництві та у якій послідовності;

б) можна визначити напрямок руху матеріальних і енергетичних потоків ХТС;

в) можна судити про якісне або кількісне перетворення фізичних параметрів вхідних матеріальних і енергетичних потоків;

г) можна судити про типи і спосіб з'єднання елементів (апаратів і машин), про послідовність окремих технологічних процесів.

13. За структурною схемою:

а) можна визначити, які операції відбуваються у виробництві та у якій послідовності;

б) можна визначити напрямок руху матеріальних і енергетичних потоків ХТС;

в) можна судити про якісне або кількісне перетворення фізичних параметрів вхідних матеріальних і енергетичних потоків;

г) можна судити про типи і спосіб з'єднання елементів (апаратів і машин), про послідовність окремих технологічних процесів.

14. За технологічною схемою:

а) можна визначити, які операції відбуваються у виробництві та у якій послідовності;

б) можна визначити напрямок руху матеріальних і енергетичних потоків ХТС;

в) можна судити про якісне або кількісне перетворення фізичних параметрів вхідних матеріальних і енергетичних потоків;

г) можна судити про типи і спосіб з'єднання елементів (апаратів і машин), про послідовність окремих технологічних процесів.

15. По операторній схемі:

а) можна визначити, які операції відбуваються у виробництві та у якій послідовності;

б) можна визначити напрямок руху матеріальних і енергетичних потоків ХТС;

в) можна судити про якісне або кількісне перетворення фізичних параметрів вхідних матеріальних і енергетичних потоків;

г) можна судити про типи і спосіб з'єднання елементів (апаратів і машин), про послідовність окремих технологічних процесів.

16. При послідовному з'єднанні:

а) увесь технологічний потік, що виходить із попереднього апарата, надходить повністю в наступний елемент; при цьому через кожний елемент схеми потік проходить лише один раз;

б) технологічний потік сировини розділяється на більш дрібні потоки, що надходять у різні елементи системи. Вихідні потоки можуть поєднуватися в один потік, а можуть виходити із системи роздільно. Через кожний апарат реакційна суміш проходить один раз;

в) технологічний потік ділиться на частини. Одна частина загального технологічного потоку проходить через ряд послідовно з'єднаних апаратів, інша обходить один або кілька апаратів і потім з'єднується з основною частиною потоку;

г) є хоча б один зворотний технологічний потік у системі послідовно з'єднаних елементів процесу.

17. При байпасному з'єднанні:

а) увесь технологічний потік, що виходить із попереднього апарата, надходить повністю в наступний елемент; при цьому через кожний елемент схеми потік проходить лише один раз;

б) технологічний потік сировини розділяється на більш дрібні потоки, що надходять у різні елементи системи. Вихідні потоки можуть поєднуватися в один потік, а можуть виходити із системи роздільно. Через кожний апарат реакційна суміш проходить один раз;

в) технологічний потік ділиться на частини. Одна частина загального технологічного потоку проходить через ряд послідовно з'єднаних апаратів, інша обходить один або кілька апаратів і потім з'єднується з основною частиною потоку;

г) є хоча б один зворотний технологічний потік у системі послідовно з'єднаних елементів процесу.

18. При паралельнім з'єднанні елементів процесу:

а) увесь технологічний потік, що виходить із попереднього апарата, надходить повністю в наступний елемент; при цьому через кожний елемент схеми потік проходить лише один раз;

б) технологічний потік сировини розділяється на більш дрібні потоки, що надходять у різні елементи системи. Вихідні потоки можуть поєднуватися

в один потік, а можуть виходити із системи роздільно. Через кожний апарат реакційна суміш проходить один раз;

в) технологічний потік ділиться на частини. Одна частина загального технологічного потоку проходить через ряд послідовно з'єднаних апаратів, інша обходить один або кілька апаратів і потім з'єднується з основною частиною потоку;

г) є хоча б один зворотний технологічний потік у системі послідовно з'єднаних елементів процесу.

19. При рециркуляційному включенні:

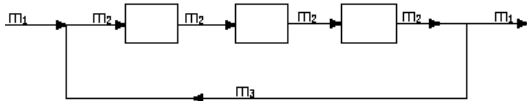
а) увесь технологічний потік, що виходить із попереднього апарата, надходить повністю в наступний елемент; при цьому через кожний елемент схеми потік проходить лише один раз;

б) технологічний потік сировини розділяється на більш дрібні потоки, що надходять у різні елементи системи. Вихідні потоки можуть поєднуватися в один потік, а можуть виходити із системи роздільно. Через кожний апарат реакційна суміш проходить один раз;

в) технологічний потік ділиться на частини. Одна частина загального технологічного потоку проходить через ряд послідовно з'єднаних апаратів, інша обходить один або кілька апаратів і потім з'єднується з основною частиною потоку;

г) є хоча б один зворотний технологічний потік у системі послідовно з'єднаних елементів процесу.

20. На рисунку зображене рециркуляційне включення апаратів.



Відношення побічного потоку до головного потоку $R = \frac{m_3}{m_2}$ називається:

- а) ступенем рециркуляції;
- б) коефіцієнтом рециркуляції.

21. На рисунку (завдання 20) відношення головного потоку до прямого потоку $r = \frac{m_2}{m_1}$ називається:

- а) ступенем рециркуляції;
- б) коефіцієнтом рециркуляції.

22. R у рівнянні $R = 1 - \frac{1}{\tau}$ – це:

- а) ступінь рециркуляції;
- б) коефіцієнт рециркуляції.

23. Величина r у рівнянні $r = \frac{1}{1 - R}$ – це:

- а) ступінь рециркуляції;
- б) коефіцієнт рециркуляції.

24. Розсіювання (просівання) основане:

а) на тому, що мінерали, що входять до складу сировини, мають різну міцність, тому при дробленні менш міцні мінерали дробляться на більш дрібні зерна, ніж міцні матеріали. Після здрібнювання таку сировину просівають через сита з отворами різного розміру і одержують фракції, збагачені тем або іншим матеріалом;

б) на відмінності швидкостей осадження часток у рідині або газі залежно від густини або крупності цих часток;

в) на різній змочувальній здатності зерен окремих мінералів водою;

г) на відділенні магнітно-сприйнятливих матеріалів від немагнітних.

25. Гравітаційний поділ оснований:

а) на тому, що мінерали, що входять до складу сировини, мають різну міцність, тому при дробленні менш міцні мінерали дробляться на більш дрібні зерна, ніж міцні матеріали. Після здрібнювання таку сировину просівають через сита з отворами різного розміру і одержують фракції, збагачені тем або іншим матеріалом;

б) на відмінності швидкостей осадження часток у рідині або газі залежно від густини або крупності цих часток;

в) на різній змочувальній здатності зерен окремих мінералів водою;

г) на відділенні магнітно-сприйнятливих матеріалів від немагнітних.

26. Флотаційний метод збагачення оснований:

а) на тому, що мінерали, що входять до складу сировини, мають різну міцність, тому при дробленні менш міцні мінерали дробляться на більш дрібні зерна, ніж міцні матеріали. Після здрібнювання таку сировину просівають через сита з отворами різного розміру і одержують фракції, збагачені тем або іншим матеріалом;

б) на відмінності швидкостей осадження часток у рідині або газі залежно від густини або крупності цих часток;

в) на різній змочувальній здатності зерен окремих мінералів водою;

г) на відділенні магнітно-сприйнятливих матеріалів від немагнітних.

27. Магнітна сепарація основана:

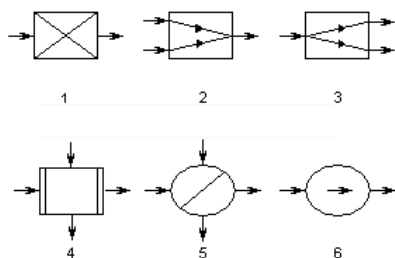
а) на тому, що мінерали, що входять до складу сировини, мають різну міцність, тому при дробленні менш міцні мінерали дробляться на більш дрібні зерна, ніж міцні матеріали. Після здрібнювання таку сировину просівають через сита з отворами різного розміру і одержують фракції, збагачені тем або іншим матеріалом;

б) на відмінності швидкостей осадження часток у рідині або газі залежно від густини або крупності цих часток;

в) на різній змочувальній здатності зерен окремих мінералів водою;

г) на відділенні магнітно-сприйнятливих матеріалів від немагнітних.

28. На рисунку зображені технологічні оператори. Вкажіть оператор хімічного перетворення:



- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;
- д) 5;
- е) 6;
- ж) 7.

29. На рисунку (завдання 28) вкажіть оператор змішання:

- | | |
|-------|-------|
| а) 1; | д) 5; |
| б) 2; | е) 6; |
| в) 3; | ж) 7. |
| г) 4; | |

30. На рисунку (завдання 28) вкажіть оператор поділу:

- | | |
|-------|-------|
| а) 1; | д) 5; |
| б) 2; | е) 6; |
| в) 3; | ж) 7. |
| г) 4; | |

31. На рисунку (завдання 28) укажіть оператор міжфазового масообміну:

- | | |
|-------|-------|
| а) 1; | д) 5; |
| б) 2; | е) 6; |
| в) 3; | ж) 7. |
| г) 4; | |

32. На рисунку (завдання 28) вкажіть оператор нагрівання або охолодження:

- | | |
|-------|-------|
| а) 1; | д) 5; |
|-------|-------|

- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;

- е) 6;
- ж) 7.

33. На рисунку (завдання 28) вкажіть оператор стискання або розширення газу:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;

- д) 5;
- е) 6;
- ж) 7.

34. На рисунку (завдання 28) вкажіть оператор зміни агрегатного стану:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4;

- д) 5;
- е) 6;
- ж) 7.

35. Коефіцієнт використання енергії визначається за рівнянням

$$\eta_e = \frac{W_T}{W_{\text{пр}}}, \text{ де } W_T - \text{це:}$$

- а) кількість енергії, затрачена теоретично на одержання продукту;
- б) кількість енергії, затрачена практично на одержання продукції;
- в) кількість тепла, затрачена теоретично на здійснення хімічної реакції;
- г) кількість тепла, затрачена практично на здійснення хімічної реакції.

36. Коефіцієнт використання енергії визначається за рівнянням

$$\eta_e = \frac{W_T}{W_{\text{пр}}}, \text{ де } W_{\text{пр}} - \text{це:}$$

- а) кількість енергії, затрачена теоретично на одержання продукту;
- б) кількість енергії, затрачена практично на одержання продукції;
- в) кількість тепла, затрачена теоретично на здійснення хімічної реакції;
- г) кількість тепла, затрачена практично на здійснення хімічної реакції.

37. Тепловий коефіцієнт корисної дії визначається за рівнянням

$$\eta_T = \frac{Q_T}{Q_{\text{пр}}}, \text{ де } Q_T - \text{це:}$$

- а) кількість енергії, затрачена теоретично на одержання продукту;
- б) кількість енергії, затрачена практично на одержання продукції;
- в) кількість тепла, затрачена теоретично на здійснення хімічної реакції;
- г) кількість тепла, затрачена практично на здійснення хімічної реакції.

38. Тепловий коефіцієнт корисної дії визначається за рівнянням

$$\eta_t = \frac{Q_T}{Q_{\text{пр}}}, \text{ де } Q_{\text{пр}} - \text{це:}$$

- а) кількість енергії, затрачена теоретично на одержання продукту;
- б) кількість енергії, затрачена практично на одержання продукції;
- в) кількість тепла, затрачена теоретично на здійснення хімічної реакції;
- г) кількість тепла, затрачена практично на здійснення хімічної реакції.

39. Теплова енергія високого потенціалу має значення:

- а) більше 630 K;
- б) від 373 до 623 K;
- в) від 323 до 423 K.

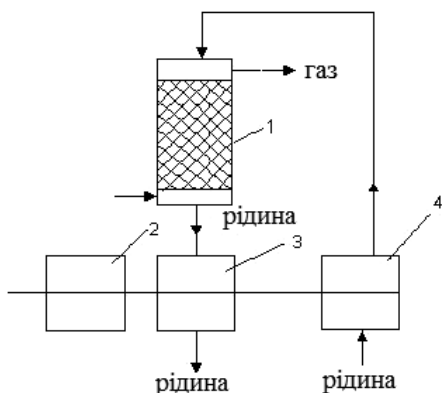
40. Теплова енергія середнього потенціалу має значення:

- а) більше 630 K;
- б) від 373 до 623 K;
- в) від 323 до 423 K.

41. Теплова енергія низького потенціалу має значення:

- а) більше 630 K;
- б) від 373 до 623 K;
- в) від 323 до 423 K.

42. На рисунку зображена схема утилізації енергії стиснених газів у системах, що працюють під високим тиском, апарат під номером 1 – це:



- а) реактор;
- б) електродвигун;
- в) турбіна;
- г) насос.

43. На рисунку зображена схема утилізації енергії стиснених газів у системах (завдання 42), що працюють під високим тиском, апарат під номером 2 – це:

- а) реактор;

- б) електродвигун;
- в) турбіна;
- г) насос.

44. На рисунку зображена схема утилізації енергії стиснених газів у системах (завдання 42), що працюють під високим тиском, апарат під номером 3 – це:

- а) реактор;
- б) електродвигун;
- в) турбіна;
- г) насос.

45. На рисунку зображена схема утилізації енергії стиснених газів у системах (завдання 42), що працюють під високим тиском, апарат під номером 4 – це:

- а) реактор;
- б) електродвигун;
- в) турбіна;
- г) насос.

46. Підвищення активності каталізатора:

- а) збільшує енерговитрати;
- б) зменшує енерговитрати;
- в) не позначається на енерговитратах;

47. Підвищення стабільності каталізатора:

- а) збільшує експлуатаційні витрати;
- б) зменшує експлуатаційні витрати;
- в) не позначається на експлуатаційних витратах.

48. Вторинні енергетичні ресурси (ВЕР) – це:

- а) енергія, яка може бути отримана при використанні енергетичного потенціалу кінцевих і проміжних продуктів, у хіміко-технологічній системі;
- б) енергоресурси, запаси яких у міру їх видобутку із земної кори необоротно зменшуються;
- в) паливо, при стисканні якого утворюються топкові гази.

49. Непоновлювані джерела енергії – це:

- а) енергія, яка може бути отримана при використанні енергетичного потенціалу кінцевих і проміжних продуктів, у хіміко-технологічній системі;
- б) енергоресурси, запаси яких у міру їх видобутку із земної кори необоротно зменшуються;
- в) паливо, при стисканні якого утворюються топкові гази.

50. Горючі вторинні енергетичні ресурси – це:

а) хімічна енергія відходів технологічних процесів хімічної та термохімічної переробки вуглецевої або вуглецеводневої сировини, горючих газів печей, що не використовуються для подальшої технологічної переробки деревних відходів і т.п.;

б) фізична теплота газів, що відходять, технологічних агрегатів, основної, побічної, проміжної продукції і відходів основного виробництва, робочих тіл систем примусового охолодження технологічних агрегатів і установок, гарячої води і пари, відпрацьованих у технологічних і силових установках;

в) потенційна енергія газів і рідин, що виходять із технологічних агрегатів з надлишковим тиском.

51. Теплові вторинні енергетичні ресурси – це:

а) хімічна енергія відходів технологічних процесів хімічної та термохімічної переробки вуглецевої або вуглецеводневої сировини, горючих газів печей, що не використовуються для подальшої технологічної переробки деревних відходів і т.п.;

б) фізична теплота газів, що відходять, технологічних агрегатів, основної, побічної, проміжної продукції і відходів основного виробництва, робочих тіл систем примусового охолодження технологічних агрегатів і установок, гарячої води і пари, відпрацьованих у технологічних і силових установках;

в) потенційна енергія газів і рідин, що виходять із технологічних агрегатів з надлишковим тиском.

52. Вторинні енергетичні ресурси надлишкового тиску – це:

а) хімічна енергія відходів технологічних процесів хімічної та термохімічної переробки вуглецевої або вуглецеводневої сировини, горючих газів печей, що не використовуються для подальшої технологічної переробки деревних відходів і т.п.;

б) фізична теплота газів, що відходять, технологічних агрегатів, основної, побічної, проміжної продукції і відходів основного виробництва, робочих тіл систем примусового охолодження технологічних агрегатів і установок, гарячої води і пари, відпрацьованих у технологічних і силових установках;

в) потенційна енергія газів і рідин, що виходять із технологічних агрегатів з надлишковим тиском.

11.6 Задачі

Задача 1. Теплоелектростанція спалює 100000 тон вугілля за добу, який містить у своєму складі: сірка – 2%, зола – 25% та вуглець. При цьому ступінь перетворення сірки – 95%, а вуглецю – 93%. Складіть матеріальний

баланс процесу спалювання вугілля та зробіть висновки щодо забруднення навколишнього середовища.

Задача 2. За крекінгу природного газу, який містить у своєму складі 98% метану і 2% азоту, з апарату виходить газ з вмістом C_2H_2 у кількості 15%. Складіть матеріальний баланс (у кг) процесу на 1000 м^3 вихідного газу без врахування побічних реакцій.

Задача 3. Складіть матеріальний баланс процесу випалу 100 кг вуглецевого колчедану, який містить у своєму складі: сірка – 50% мас., вуглець – 6% мас., волога – 2% мас. та мінеральні домішки. Ступінь перетворення колчедану складає 90%.

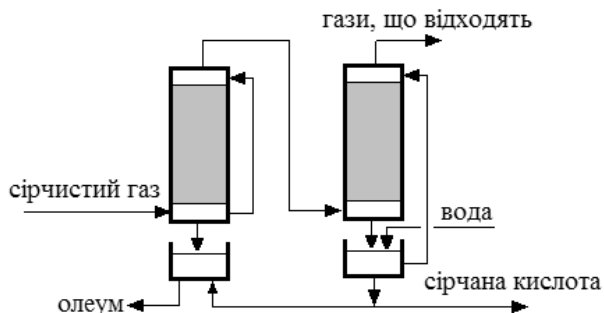
Задача 4. Складіть матеріальний баланс виробництва 1 тони окису етилену каталітичним окисненням етилену повітрям. Склад вихідної газової суміші наступний: C_2H_4 – 3% об., повітря – 97% об. Ступінь перетворення етилену – 50%.

Задача 5. Скласти матеріальний баланс одержання 3200 кг сірчистого ангідриду з сірководневого газу наступного складу: H_2S – 80% об., N_2 – 15% об., волога – 5% об. Повітря, що використовується для спалювання сірководню містить 4% об. вологи. Коефіцієнт надлишку повітря складає 1,2.

Задача 6. Скласти матеріальний баланс процесу спалювання 10 кг мазуту елементарного складу: вуглець – 86%, водень – 14%. Спалювання відбувається повністю з надлишком повітря 1,5.

Задача 7. Яку кількість розчинів сірчаної кислоти 93% і 48 % мас. за H_2SO_4 потрібно змішати, щоб отримати 1000 кг 83%-ї сірчаної кислоти. Складіть матеріальний баланс за всією масою речовин та за компонентом (вода, сірчаний ангідрид або моногідрат H_2SO_4).

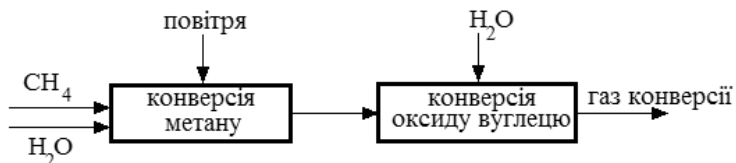
Задача 8. У абсорбційну установку подається $10000\text{ м}^3/\text{год}$ газу, який містить 7,5% об. двоокису сірки. У результаті абсорбції одержують 2000 кг/год олеуму з вмістом вільного триокису сірки у кількості 15% і 93% мас. сірчаної кислоти. Загальна ступінь абсорбції дорівнює 0,995%. Складіть матеріальний баланс установки і ступінь абсорбції у першому скрубєрі. Схема матеріальних потоків абсорбційного відділення у виробництві сірчаної кислоти:



Задача 9. У абсорбційну установку подається $20000 \text{ м}^3/\text{год}$ газу, який містить 7,8% об. двоокису сірки. У результаті абсорбції одержують олеум з вмістом вільного триокису сірки у кількості 10% і 93% мас. сірчаної кислоти. Ступінь поглинання триокису сірки у першому адсорбері складає 40%. Загальна ступінь абсорбції дорівнює 0,995%. Складіть матеріальний баланс установки. Схема матеріальних потоків абсорбційного відділення у виробництві сірчаної кислоти надана у задачі 8.

Задача 10. Скласти рівняння матеріального балансу за газовою і рідкою фазами для розрахунку матеріальних потоків хіміко-технологічної системи (задача 8). При цьому об'єм газу, що входить – V_j , концентрація сірчаного ангідриду – C_{SO_2} , ступінь абсорбції у олеум адсорбері – β_1 , загальна ступінь абсорбції – β .

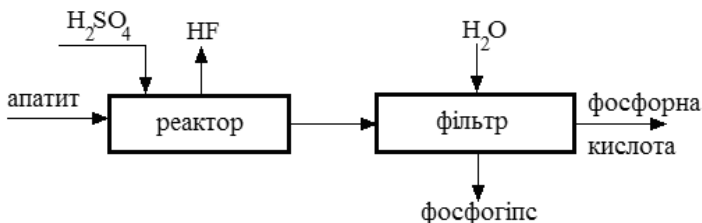
Задача 11. Скласти матеріальний баланс для хіміко-технологічної системи конверсії метану водяною парою з метою одержання стехіометричної азотно-водневої суміші для синтезу аміаку. Об'єм метану, який піддають конверсії – V_j , мольне співвідношення метану і водяної пари – 1:3. Схема матеріальних потоків у процесі конверсії метану водяною парою:



Задача 12. В установку конверсії метану водяною парою (задача 11) подається $20000 \text{ м}^3/\text{год}$ метану. Ступінь конверсії метану 0,98. Оксид вуглецю, що утворюється у результаті конверсії метану, піддається конверсії водяною парою у реакторі та ступінь його конверсії складає 0,96. Складіть

матеріальний баланс установки виробництва азотно-водневої суміші зі співвідношенням азоту до водню – 1:3,1.

Задача 13. Скласти матеріальний баланс хіміко-технологічної системи виробництва 1500 кг/год 36%-ої ортофосфорної кислоти розкладанням апатиту, який містить – 52% CaO , 34% P_2O_5 , 4% мас. фосфору, решта баласт. Розкладання відбувається сірчаною кислотою концентрацією 63%. Ступінь розкладання фосфориту складає 96%, ступінь відмивання кислоти на фільтрі – 0,99. Співвідношення твердої і рідкої фаз на виході з реактору повинно складати 1:3. Вологість твердої фази на виході рівна 35% мас. Схема одержання фосфорної кислоти:



Задача 14. Скласти матеріальний баланс реактора окиснення аміаку, у який поступає аміачно-повітряна суміш з витратою 10000 м³/год, що містить 9% об. аміаку. Ступінь перетворення аміаку 0,98, а селективність за окисом азоту 0,95. побічним продуктом вважати лише азот.

Задача 15. Скласти рівняння матеріального балансу для розрахунку матеріальних потоків хіміко-технологічної системи синтезу аміаку, якщо об'єм вхідного газу – V_0 , концентрація метану у аміачно-повітряній суміші (АПС) – C_{CH_4} , ступінь перетворення АПС у реакторі – X , рециркуляційний газ має склад: CH_4 , NH_3 і АПС. Схема матеріальних потоків в установці синтезу аміаку:



Задача 16. Складіть матеріальний баланс хіміко-технологічної системи (задача 15) синтезу аміаку потужністю 10000 кг/год аміаку з аміачно-повітряної суміші, яка містить 0,5% об. CH_4 . Ступінь перетворення АПС у реакторі – 0,18. Склад рециркуляційного газу: CH_4 – 6%, NH_3 – 3%, решта АПС.

Задача 17. Розрахувати склад і кількість нітрозних газів, які одержують за окиснення $850 \text{ м}^3/\text{год}$ аміачно-повітряної суміші, що містить 9% аміаку. Ступінь окиснення аміаку складає 0,97, а вихід оксиду азоту – 0,95.

Задача 18. У абсорбційну установку подається $15000 \text{ м}^3/\text{год}$ газу, який містить 8,3% об. двоокису сірки. У результаті абсорбції одержують олеум з вмістом двоокису сірки у кількості 20% і 98%-ну сірчану кислоту. Ступінь адсорбції в олеумному абсорбері складає 0,2, а загальна ступінь абсорбції – 0,99%. Складіть матеріальний баланс установки. Схема матеріальних потоків абсорбційного відділення у виробництві сірчаної кислоти надана у задачі 8.

Задача 19. Скласти хімічну і структурну схеми одержання ацетилену з негашеного вапна та рівняння матеріального балансу, якщо відомі витрата негашеного вапна, її склад і ступінь перетворення.

Задача 20. Скласти матеріальний баланс печі згоряння сірки потужністю 60 т/добу. Ступінь окиснення сірки 0,95 (решта сірки сублімується і згоряє поза піччю). Коефіцієнт надлишку повітря 1,5. Розрахунок вести на потужність печі за сіркою, що згоряє, у кілограмах на годину.

Задача 21. Скласти матеріальний баланс виробництва оксиду етилену прямим каталітичним окисненням етилену повітрям. Склад вихідної газової суміші – 3% об. етилену у повітрі. Ступінь окиснення етилену 0,5. розрахунок вести на 1 тону окису етилену. Процес описується хімічним рівнянням наступного вигляду: $2\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2(\text{C}_2\text{H}_2)_2\text{O}$.

Задача 22. Скласти матеріальний баланс печі окислювального випалу у виробництві ванадату натрію. Сировина: ванадієвий шлак, який містить 13% мас. V_2O_5 , повітря, хлорид натрію, витрата якого складає 10 % від маси шлаку. Розрахунок вести на 1 тону готового продукту. Процес розглядати як двостадійний:

Перша стадія – $2\text{NaCl} + 0,5\text{O}_2 = \text{Na}_2\text{O} + \text{Cl}_2$

Друга стадія – $\text{Na}_2\text{O} + \text{V}_2\text{O}_5 = 2\text{NaVO}_3$.

Задача 23. Скласти матеріальний баланс хлоратора у виробництві 1 т хлорбензолу. Вміст продуктів у % мас.: бензол – 65; хлорбензол – 32; дихлорбензол – 2,5; трихлорбензол – 0,5. технічний бензол містить 97,5% мас. C_6H_6 , технічний хлор – 98% мас. Cl_2 .

Задача 24. Скласти матеріальний баланс нітратору потужністю 3 т/год нітробензолу. Вихід нітробензолу складає 98% від теоретичного. Склад нітруючої суміші у % мас.: HNO_3 – 20; H_2SO_4 – 60; H_2O – 20. Витрата нітруючої суміші 4 кг на 1 кг бензолу. Нітрування бензолу відбувається у реакторі за реакцією: $\text{C}_6\text{H}_6 + \text{HNO}_3 = \text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Задача 25. Скласти матеріальний баланс установки для одержання аміачної селітри потужністю 20 тон NH_4NO_3 за годину вологістю 5% мас. У виробництві застосовується 47%-ва азотна кислота та 100%-ий газоподібний аміак. Втрати азотної кислоти і аміаку у виробництві складають 1% потужності. З нейтралізатору аміачна селітра виходить у вигляді 60%-го розчину NH_4NO_3 у воді. Визначити кількість води, яка випарувалась у результаті екзотермічної реакції нейтралізації: $\text{HNO}_3 + \text{NH}_3 = \text{NH}_4\text{NO}_3$.

Задача 26. Скласти матеріальний баланс виробництва хлору методом електролізу водного розчину хлориду натрію. Концентрація хлориду натрію у розчині 310 г/л. Ступінь розкладання 50%. Густина розчину за умови електролізу 1,17 кг/л. Розрахунок вести на 1000 м³ хлору. Процес описується наступним рівнянням: $2\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Задача 27. При газифікації коксу, який містить 96,8% мас. вуглецю і 3,5% мас. води, водяною парою одержують газ, у склад якого входить 6% об. двоокису вуглецю. Розрахувати склад одержаного газу та скласти матеріальний баланс процесу.

Задача 28. При термоокислювальному крекінгу метану для одержання ацетилену суміш газів має наступний склад у % об.: C_2H_2 – 9; H_2 – 57; CO – 25,3; CO_2 – 3,7; CH_4 – 4; Ar – 1. Визначити кількість метану, яку потрібно піддати крекінгу, щоб з відходів крекінгу після відділення ацетилену одержати 1 тону метанолу за реакцією: $\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}$. З 1 тони вихідного метану після виділення ацетилену одержують 1160 кг суміші газів.

Задача 29. Складіть матеріальний баланс виробництва 1 тони сульфату натрію, якщо у виробництві використовується кухарська сіль, що містить 97% мас. хлориду натрію, і купоросне масло, яке містить 93% мас. сірчаної кислоти. Ступінь розкладання хлориду натрію складає 93%.

Задача 30. Складіть матеріальний баланс виробництва 1 тони технічного сульфіді натрію (вміст Na_2S – 96% мас.) з сульфату натрію (вміст Na_2SO_4 – 95,5% мас.) і електролітичного водню (вміст H_2 – 97% мас.). На побічні реакції витрачається 2% Na_2SO_4 і H_2 від теоретично необхідної кількості для одержання 1 тони технічного продукту. Основна реакція одержання продукту має наступний вигляд: $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{H}_2 = \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$.

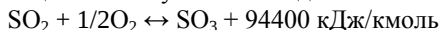
Задача 31. Скласти матеріальний баланс виробництва 10000 т/годину 90,4%-ї сірчаної кислоти з сірчаного колчедану, який містить 42 % сірки, за умови, що ступінь вигорання сірки у колчедані складає 97%, ступінь каталітичного окиснення двоокису сірки – 99,3%, а ступінь абсорбції триоксиду сірки – 99,5%. Випалювальний газ містить 8% двоокису сірки. Повітря вологістю 55% перед подачею у піч для випалювання колчедану

піддається сушінню сірчаною кислотою, яка одержується. Схема виробництва сірчаної кислоти:



Задача 32. Розрахувати матеріальний баланс виробництва 61%-ї азотної кислоти за умови, що вихід оксиду азоту за окиснення аміаку складає 97%. Побічні продукти окиснення – тільки азот. Ступінь абсорбції двоокису азоту складає 99%. Аміачно-повітряна суміш перед реактором окиснення містить 9% аміаку. Повітря, що подається на виробництво, має відносну вологість 47%.

Задача 33. Ступінь окиснення SO_2 в SO_3 становить: $x_1 = 0,55$ і $x_2 = 0,96$. Розрахувати зміну температури у зоні реакції, якщо середня теплоємність газової суміші, що містить $\text{SO}_2 - 8\%$, $\text{O}_2 - 11\%$ і $\text{N}_2 - 81\%$, умовно вважається незмінною і становить $1,382 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$. Розрахунки вести на 100 м^3 газової суміші. Рівняння реакції має наступний вигляд:



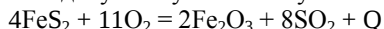
Задача 34. На перший шар контактного апарату за 4500°C подається $10000 \text{ м}^3/\text{год}$ вихідної газової суміші, що містять (в % об'ємних): $\text{SO}_2 - 10,0\%$, $\text{O}_2 - 11,0\%$, $\text{N}_2 - 79,0\%$. У результаті маємо екзотермічну реакцію виду: $\text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{SO}_3 + Q'$ (де $Q' = 101420 - 9,26T_{\text{кр}} \text{ кДж/моль}$).

$T_{\text{ср}}$ розраховують за формулою: $T_{\text{ср}} = (T_{\text{кін}} - T_{\text{поч}})/2, 3lg T_{\text{кін}}/T_{\text{поч}}$.

Температура газу підвищилася до 580°C . Визначити ступінь окиснення SO_2 у SO_3 , якщо прийняти теплоємність газу незмінною і рівною $c = 1,38 \text{ кДж}/\text{м}^3$ (зміною об'єму у результаті реакції зневажаємо).

Задача 35. Розрахувати теоретичну температуру горіння етану (теплота згоряння $1,65 \cdot 10^6 \text{ кДж/моль}$) при надлишку повітря 20%.

Задача 36. Визначити кількість теплоти, що виділяється при випалі 1 т FeS_2 , що містить 38% сірки, якщо ступінь вигорання сірки з колчедану $x = 0,96$. Процес горіння колчедану описується наступним сумарним рівнянням:



Теплоти утворення у кДж/моль : $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 821,3$; $\text{SO}_2 - 296,90$; $\text{FeS}_2 - 177,4$.

Чистий FeS_2 містить 53,35% сірки і 46,65% заліза.

Задача 37. Скласти тепловий баланс генератора водяного газу при газифікації 1 т коксу, що містить 93% (мас.) вуглецю; 4% (мас.) золи і 3%

(мас.) води та подачі 1575 кг водяного газу на 1 т коксу. При цьому утворюється 2190 кг водяного газу, що містить 89,9% (мас.) CO, 1,94% (мас.) CO₂ і 8,16% (мас.) H₂. Температура водяного газу на виході з генератора 1000⁰C, температура коксу, що подається, 25⁰C і водяної пари 100⁰C.

Задача 38. Скласти тепловий розрахунок кристалізації плаву аміачної селітри у грануляційній вежі. Вихідні дані: температура повітря на вході у гранвежу 30⁰C, на виході 60⁰C; у вежу надходить на 1000 кг аміачної селітри 1015,21 кг плаву, що містить 98,5% NH₄NO₃; температура плаву, що надходить у вежу, 150⁰C; температура гранул, що виходять із вежі, 80⁰C. Розрахунки ведуться на 1000 кг аміачної селітри.

Задача 39. Скласти тепловий розрахунок колони синтезу сечовини. Вихідні дані: температура реагентів, що надходять у колону синтезу: рідкого аміаку – 105⁰C, двоокису вуглецю – 35⁰C; температура у колоні синтезу – 200⁰C, критична температура аміаку – 132,9⁰C. Ентальпія рідкого аміаку: 939,9 кДж/кг за 132,9⁰C і 553,12 кДж/кг за 105⁰C.

Залежність теплового ефекту реакції конверсії карбамату амонію від надлишку аміаку за 155–200⁰C:

Надлишок аміаку від стехіометричного	0	50	100	200	300
Тепловий ефект, кДж/кмоль	14235	13308	18422	20515	22609

Кількість вихідних реагентів і продуктів реакції приймають згідно матеріального балансу. Розрахунок ведеться на 1000 кг готового продукту.

Матеріальний баланс одержання сечовини (на 1000 кг продукту):

Прихід			Витрата		
Речовина	кг	%	Речовина	кг	%
Аміак	1949	62,53	Сечовина	1070,0	34,33
Двоокис вуглецю	1121	35,97	Карбамат амонію	596,2	19,13
Інертні гази	46,7	1,5	Вода	321,0	10,30
			Надлишковий аміак, у т.ч.:	1082,8	34,74
			– у вигляді аміаку	303,2	
			– у газоподіб- ному вигляді	779,6	
			Інертні гази	46,7	1,50
Всього	3116,7	100	Всього	3116,7	100

Задача 40. Скласти тепловий баланс реактора для одержання водню каталітичною конверсією метану. Розрахунки ведемо на 1000м³ H₂. Втрати теплоти у навколишнє середовище прийемо 6% від приходу теплоти.

Розрахунки ведемо за реакцією: CH₄ + H₂O ↔ CO + 3H₂ – 206200 кДж.

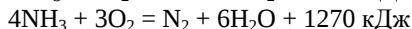
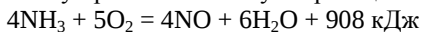
Вихідні дані: $\text{CH}_4:\text{H}_2\text{O} = 1:2$; температура реагентів, що вступають у реактор, 105°C ; температура у зоні реакції 900°C ; теплоємності у $\text{kJ}/(\text{кмоль}^\circ\text{C})$:

Темпер.	CH_4	H_2O	CO	H_2
100°C	36,72	33,29	28,97	29,10
900°C	—	38,14	31,36	29,90

Задача 41. За умовою задачі 32 скласти тепловий баланс реактора окиснення аміаку, вважаючи, що температура повітря складає 21°C . Окиснення аміаку ведуть за температури 850°C . Втрати теплоти у навколишнє середовище складає 5% від загальної кількості тепла.

Задача 42. Скласти матеріальний баланс реактора окиснення аміаку, у який поступає аміачно-повітряна суміш з витратою $60000 \text{ м}^3/\text{год}$, яка містить 10% об. аміаку. Селективність за оксидом азоту складає 0,95 за умови повного перетворення аміаку. Приймаємо, що у якості єдиного побічного продукту утворюється азот.

Задача 43. Для умови задачі 42 скласти тепловий баланс реактору окиснення аміаку, у якому протікають наступні реакції:

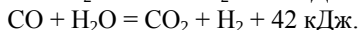
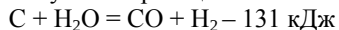


Прийняти наступні значення теплоємностей для газів, $\text{kJ}/(\text{моль}^\circ\text{град})$: аміак – 38,5; кисень – 30,2; азот – 29,2; водяна пара – 38; оксид азоту – 31,9. температура у реакторі 1150 K , загальний тиск $0,7 \text{ МПа}$.

Задача 44. Розрахувати кількість і склад газу, який одержують за окиснення 900 м^3 аміачно-повітряної суміші, що містить 6% мас. аміаку у повітрі. Ступінь окиснення аміаку складає 0,97, вихід оксиду азоту дорівнює 95%. Вважати, що аміак окислюється до оксиду азоту (II) і азоту.

Задача 45. Визначити витрату бурого вугілля (70% мас. вуглецю), водяної пари і повітря для одержання 1000 м^3 генераторного газу, у склад якого входять, % об.: $\text{CO} - 40$; $\text{H}_2 - 18$; $\text{N}_2 - 42$. Процес газифікації протікає за наступними реакціями: $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$ і $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$.

Задача 46. Скласти матеріальний баланс процесу газифікації 1 тони коксу, який протікає за наступними реакціями:



Кокс містить 3% мас. Зольних домішок, масове співвідношення пара:кокс = 1,5:1. Ступінь перетворення вуглецю у коксі – 0,98, вихід моно оксиду вуглецю – 0,9. Знайти також загальну кількість підведеного тепла.

Задача 47. Скласти матеріальний баланс процесу парової конверсії метану: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2 - 206,4 \text{ кДж}$. Розрахувати кількість витраченої теплоти, якщо ступінь перетворення метану дорівнює 0,95, мольне співвідношення води:метану = 3:1. Розрахунок вести на 1000 м³ вихідної парогазової суміші.

Задача 48. Скласти матеріальний баланс, розрахувати вихід двоокису сірки і кількість вивільненої теплоти у процесі випалу 1000 кг колчедану за стехіометричної подачі повітря: $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2 + 3416 \text{ кДж}$.

Колчедан містить пірит – FeS_2 і негорючі домішки. Вміст сірки у колчедані 41%, а у огарку – 0,5%.

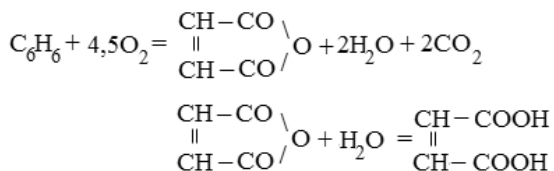
Задача 49. Скласти матеріальний баланс електрокрекінга природного газу (склад газу, % об.: метан – 98; азот – 2): $2\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2$.

Якщо ступінь перетворення метану дорівнює 0,51. Скласти баланс:

1. На 1000 м³ вихідного газу;
2. На 1000 м³ ацетилену;
3. На 1000 м³ водню.

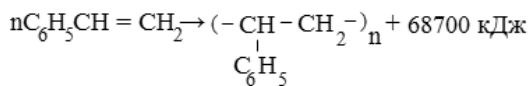
Задача 50. скласти матеріальний баланс виробництва 1500 кг/год аміачної селітри вологістю 3% мас., яку одержують нейтралізацією аміачної води, що містить 25% мас. аміаку, азотної кислоти, що містить 58% мас. HNO_3 за температури 105⁰С. Водний розчин аміачної селітри подають на вакуум-випарний апарат для видалення води, а плав селітри після випаровування – на грануляцію. Ступінь перетворення за азотною кислотою і аміаком дорівнює 100%. Втрати аміаку у виробництві селітри складають 3% мас.

Задача 51. Скласти матеріальний баланс виробництва малеїнового ангідриду повітряним окисненням бензолу. У реакторі окиснення протікають наступні реакції:



Установка переробляє 2500 кг бензолу у годину при ступені його перетворення 0,98. Вихід малеїнової кислоти на перетворений бензол складає 4%. Мольне співвідношення бензолу і кисню у пароповітряній суміші складає 1:6.

Задача 52. Скласти матеріальний і тепловий баланси реактора полімеризації стиролу:



Стирол у кількості 2000 кг/год подається у реактор за температури 50⁰С. Реакція полімеризації здійснюється у ізотермічному режимі. Температура реакційної маси на виході дорівнює 145⁰С. Ступінь перетворення стиролу складає 0,9. Температура охолодження води на вході рівна 20⁰С, а на виході – 60⁰С. Прийняти теплоємності компонентів реакційної суміші наступними:

Теплоємність, кДж/(кг·град), за температури, ⁰ С	Стирол	Полістирол
50	1,742	1,457
145	2,479	3,100

Втрати теплоти складають 1,5%.

12. СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Архаров А.М. Теплотехника: Учебник для студентов вузов / А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
2. Бажин Н.М. Термодинамика для химиков / Н.М. Бажин, В.А. Иванченко, В.Н. Пармон. – М.: Химия, 2000. – 407 с.
3. Байрамов В.М. Основы химической кинетики и катализа / В.М. Байрамов. – М.: Академия. 2003. – 256 с.
4. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика / Г.Д. Бэр – М.: Мир, 1977. – 518 с.
5. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. / Пер с англ. под ред. Ступоченко Е. В. – М.: Издательство, 1961. – 929 с.
6. Глишков М.А. Общая теория печей / М.А. Глишков, С.М. Глишков – М.: Металлургия, 1978. – 264 с.
7. Грошева Л.П. Принцип составления энергетического (теплового) баланса и тепловые расчеты химико-технологических процессов / Грошева Л.П. – В. Новгород: Новгородский государственный университет, 2006. – 14 с.
8. Денисов. Е.Т. Химическая кинетика / Е.Т. Денисов, О.М. Саркисов, Г.И. Лихтенштейн. – М.: Химия. 2000. – 566 с.
9. Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Печи и сушилы литейного производства: учебник для техникумов 2-е изд., перераб. и доп. / Г.П. Долотов, Е.А. Кондаков – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
10. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» / Г.Н. Дульнев – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
11. Еремин В.В. Основы физической химии. Теория и задачи: уч. пособие для вузов / В.В.Еремин, С.И. Каргов, И.А.Успенская, Н.Е. Кузьменко, В.В. Лушин. – М.: Экзамен, 2005. – 480 с.
12. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству / В.Н. Иванов – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
13. Игнатенков В.И. Примеры и задачи по общей химической технологии / Игнатенков В.И., Бесков В.С. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 198 с.
14. Исаев С.И. Термодинамика / С.И. Исаев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 416 с.
15. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для вузов 4-е изд., перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
16. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования 2-е изд., дополн. и перераб. / Е.И. Казанцев – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

17. Карякин, Н.В. Основы химической термодинамики / Н.В. Карякин. – М.: АCADEMA, 2003. – 462 с.
18. Кошкин В.К. Термодинамическая теория истечения газов и паров. Процесс дросселирования / В.К. Кошкин, Т.В. Михайлова. – М.: Буква, 1983. – 53 с.
19. Краснощеков Е. А. Задачник по теплопередаче: учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
20. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8-е. Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономарёвой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
21. Кривандиш В.А. Металлургическая теплотехника. В 2-х томах. Т.1. Теоретические основы: учебн. для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, Б.С. Мاستрюков и др. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
22. Кудинов В.А. Техническая термодинамика: Учеб. пособие для вузов 3-е изд., испр. / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2003. – 261с.
23. Лариков Н.Н. Теплотехника / Н.Н. Лариков – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
24. Луканин В.Н. Теплотехника: Учеб. для вузов 5-е изд., стер / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высшая школа, 2005. – 671 с.
25. Мещеряков А.С. Термодинамика и теплообмен в литейных процессах: учебн. Пособие / А.С. Мещеряков – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1993. – 460 с.
26. Михеев М.А. Основы теплопередачи: изд. 2-е. / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
27. Мюнстер А. Химическая термодинамика / Пер. с нем. Под ред. Герасимова Я.И. – М.: Мир, 1971. – 295 с.
28. Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / И.А. Недужий, А.Н. Алабовский. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 248 с.
29. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин, под ред. Ю.А. Чизмадзе. – М.: Издательство «Мир», 1979. – 512 с.
30. Никольский Л.Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1981. – 320 с.
31. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков – М.: Химия, 1987. – 622 с.
32. Панкратов Г.П. Сборник задач по теплотехнике / Г.П. Панкратов – М.: Высшая школа, 1986. – 248 с.
33. Полторак О.М. Термодинамика в физической химии / О.М. Полторак. – М.: Высшая школа, 1991. – 347 с.

34. Пригожин, И. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепудис. – М.: Мир, 2002. – 462 с.
35. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике: изд. 5-е. / О.М. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
36. Радченко И.В. Молекулярная физика / И.В. Радченко – М.: Наука, 1965. – 480 с.
37. Романовский Б.В. Основы химической кинетики / Б.В. Романовский. – М.: Экзамен. 2006. – 415 с.
38. Русанов А. И. Фазовые равновесия и поверхностные явления / Русанов А. И. – Л.: Химия, 1967. – 388 с.
39. Сидельников Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л.Н. Сидельников, В.Н. Юренов – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528с.
40. Смирнова Н.А. Методы статистической термодинамики в физической химии / Н.А. Смирнова– М.: Высшая школа, 1982. – 456 с.
41. Смородинский Я.А. Температура / Я.А. Смородинский – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 160с.
42. Телегин А.С. Теплотехника и нагревательные устройства: учебн. пособие для машиностроительных техникумов по специальности «Ковочно-штамповочное производство» / А.С. Телегин, В.Г. Авдеев – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
43. Теплотехника / Под ред. А.П. Баскакова. 2-е издание, переработанное. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
44. Теплотехника: Учебник для студентов вузов. изд. 2-е, перераб. / Под ред. П.Н. Сушкина. – М.: Металлургия, 1973. – 479 с.
45. Теплотехника: учебное пособие для студентов вузов / Под ред. Г.А. Матвеева. – М.: Высшая школа, 1981. – 480 с.
46. Техническая термодинамика: Учебник для вузов 2-е изд. перераб. и доп. / Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1981. – 439 с.
47. Трайбус М. Термостатика и термодинамика. / Пер. с англ. под ред. Лыкова А.В. – М.: Энергия, 1970. – 504 с.
48. Физическая химия / под ред. К.С. Краснова. В 2 т. т. 1. – М.: Высшая школа, 2001. – 512 с.
49. Хачкурузов Г.А. Основы общей и химической термодинамики / Г.А. Хачкурузов – М.: Высшая школа, 1979. – 268 с.
50. Черняк О.В. Основы теплотехники и гидравлики: учебник для промышленных и технических специальностей техникумов 3-е изд. сокр., перераб. / О.В. Черняк, Г.Б. Рыбчинская – М.: Высшая школа, 1979. – 246 с.

13. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ПОНЯТТЯ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Вагранка – шахтна піч для плавки чавуну у ливарних цехах.

Вагранка газова – полум'яна піч із шахтою для підігріву шихти.

Відбір регенеративний – нерегульований відбір пари із ступені турбіни для підвищення температури живильної води.

Вологість повітря абсолютна – маса водяної пари, що міститься у 1 м³ вологого повітря.

Вологість повітря відносна – відношення абсолютної вологості повітря до максимально можливої під даним тиском і за даної температури, коли повітря насичене водяною парою.

Горіння – хімічний процес сполуки палива з окиснювачем, що супроводжується інтенсивним тепловиділенням і різким підвищенням температури продуктів згоряння.

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) – тепловий двигун, у середині якого відбувається спалювання палива і перетворення частини теплоти, що виділилася, у механічну роботу.

Двигун карбюраторний – ДВЗ, у якому горюча суміш готується карбюратором поза камерою згоряння (зовнішнє сумішоутворення із примусовим запалюванням).

Детонація – процес, що швидко наближається до вибуху, горіння горючої суміші у циліндрі карбюраторного двигуна, при якому різко (у сто разів) збільшується швидкість поширення полум'я.

Діаграма індикаторна – залежність тиску газу у циліндрі від об'єму робочої порожнини циліндра.

Ділянка стабілізованого теплообміну – ділянка труби, на якій поле температури практично не залежить від розподілу температури у початковому перетині ділянки, що обігрівается.

Дизель – ДВЗ із внутрішнім сумішоутворенням і запаленням паливновітряної суміші від теплоти стислого заряду.

Дроселювання – процес зниження тиску у потоці без здійснення зовнішньої роботи і без підведення та відведення теплоти при проходженні через місцевий гідравлічний опір.

Енергія вільна – ізохорно-ізотермічний термодинамічний потенціал або енергія Гельмгольца.

Економайзер – обладнання, що обігрівается продуктами згоряння палива і призначене для підігрівання або часткового пароутворення води, що надходить у котел.

Ексергія або технічна працездатність – максимальна робота, яку чинить робоче тіло, якщо у якості холодного джерела теплоти виступає зовнішнє середовище з температурою T_0 .

Ефект Джоуля-Томсона – зміна температури газу у результаті адіабатного дроселювання.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) внутрішній відносний – ККД ступені парової турбіни, що враховує всі види втрат.

ККД індикаторний – відношення кількості теплоти Q_i еквівалентної індикаторній роботі, до всієї кількості теплоти Q , введеній у двигун з паливом.

ККД термічний – відношення корисно використаної у циклі теплоти (або отриманої роботи) до усієї кількості теплоти, витраченої на цикл.

ККД ефективний – відношення кількості теплоти, еквівалентної корисній роботі, до кількості теплоти, витраченої на одержання цієї роботи.

Компресор – машина для стискання повітря або газу до надлишкового тиску не нижче 0,2 МПа.

Компресор гвинтовий – роторний компресор, у якому робочі порожнини утворені корпусом і гвинтоподібними роторами зі спеціальними профілями.

Компресор об'ємний – компресор, у якому підвищення тиску газу відбувається при зменшенні замкненого об'єму.

Компресор відцентровий – компресор, у якому силовий вплив на газ здійснюється обертovими лопатками.

Комплекси обумовлені безрозмірні – числа подоби, що містять обумовлену величину.

Конденсація краплинна – утворення краплин конденсату на поверхні що не змочується.

Конденсація плівкова – утворення суцільної плівки конденсату на поверхні, що змочується.

Котел – конструктивно об'єднаний у одне ціле комплекс обладнання для одержання пари або для нагрівання води під тиском.

Котел прямоточний – котел з послідовним однократним примусовим рухом води.

Котельна установка – сукупність котла і допоміжного устаткування.

Коефіцієнт надлишку повітря – відношення дійсної кількості повітря V_d , що подається для організації процесу горіння, до теоретично необхідної кількості V_0 .

Коефіцієнт холодильний – відношення кількості теплоти q_2 , що виділяється у зворотному циклі від охолоджуваної системи, до витраченої роботи l_c .

Криостатування – підтримка охолоджених тіл за постійної низької температури.

Обмуровування котла – система вогнетривких і теплоізоляційних огорожень або конструкцій котла, призначена для зменшення теплових витрат і забезпечення газової густини.

Охолодження – відведення теплоти від тіл і передача її іншим тілам або у навколишнє середовище.

Охолодження і зрідження газів – зниження температури газів за $p = \text{const}$ або $v = \text{const}$ до температури конденсації і їх конденсація.

Паливо – горюча речовина, яку економічно доцільно використовувати для одержання значної кількості теплоти.

Паливо умовне – паливо, теплота згоряння якого прийнята рівною 29,35 МДж/кг.

Параметри стану – фізичні величини, що однозначно характеризують стан термодинамічної системи і не залежать від передісторії системи.

Пароутворення – процес переходу речовини з конденсованої фази (рідкої або твердої) у газову.

Пароперегрівник – обладнання для підвищення температури пари вище температури насичення, відповідно до тиску у котлі.

Парціальний тиск – тиск, який мав би газ, що входить до складу газової суміші, якби він один займав об'єм, що дорівнює об'єму суміші за тієї ж температури.

Перенесення маси дифузійне (молекулярне) – перенесення маси, обумовлене дифузією.

Перенесення маси фільтраційне (молярне) – конвективне перенесення, обумовлене гідродинамічним, макроскопічним рухом пари і рідини під впливом зовнішніх сил і перепаду тисків.

Переплавлення електрошлакове – бездуговий процес електроплавлення металів, за якого необхідна для плавки теплота виділяється при проходженні електричного струму через розплавлені електропровідні шлаки.

Піч – обладнання, у якому у результаті горіння палива або перетворення електричної енергії виділяється теплота, яка використовується для теплової обробки металів.

Піч для електрошлакового переплавлення – промислова піч, призначена для переплавлення електродів, що витрачаються, з метою одержання сталевих злитків суцільного перетину циліндричної або прямокутної форми у стаціонарні або рухливі кристалізатори.

Піч доменна – шахтна піч для виплавки чавуну із залізної руди.

Піч дугова – промислова піч, у якій теплота електричної дуги використовується для плавки металів та інших матеріалів.

Піч індукційна плавильна – піч, у якій метал перебуває у змінному електромагнітному полі, у результаті чого у металі індукується електричний струм, що нагріває його.

Піч плавильна – піч для перетворення будь-якого матеріалу у рідкий стан шляхом нагрівання його до температури, що перевищує температуру плавлення.

Піч плазменно-дугова – електрична піч, у якій нагрівання і плавлення здійснюються за допомогою плазмової дуги.

Піч промислова – сукупність обладнання, призначеного для нагрівання матеріалів або виробів.

Піч роздавальна – промислова піч для підігрівання розплавленого металу і підтримки його температури у необхідних межах.

Піч електронно-променева – високовакуумна піч (вакуум 10 МПа – 10 мкПа) для переплавлення особливо чистої сталі та тугоплавких матеріалів, у якій нагрівання основане на перетворенні кінетичної енергії прискорених, у електростатичному полі, електронів у теплову енергію при їх ударі о поверхню об'єкту, що нагрівається.

Повітря вологе – суміш сухого повітря з водяною парою.

Повітропідігрівач – обладнання для підігріву повітря продуктами згоряння палива перед подачею у топку котла.

Потужність двигуна індикаторна – потужність, що розвивається у середині циліндра.

Потужність ступені дійсного компресора індикаторна – потужність, витрачена на взаємодію робочого органа (поршня або ротора) з потоком газу, що включає усі втрати у газовому тракті, у тому числі обумовлені витоками робочого тіла і теплообміном.

Потужність ефективна – потужність, що віддається споживачеві та складова частина індикаторної потужності.

Продуктивність об'ємного компресора – об'ємна кількість газу, що подається споживачеві у одиницю часу, виміряна після компресора і приведена до умов всмоктування, тобто тиску і температури у стандартній точці всмоктування.

Процес адіабатний – відбувається у фізичній системі, що не одержує теплоту ззовні і не віддає її, тобто відсутній теплообмін робочого тіла із зовнішнім середовищем.

Процес ізобарний – процес, що відбувається у фізичній системі під постійним зовнішнім тиском.

Процес ізотермічний – процес, що відбувається у фізичній системі за постійної температури.

Процес ізохорний – процес, що відбувається у фізичній системі за постійного об'єму.

Процес необоротний – процес, який може мимовільно протікати тільки у одному напрямку.

Процес не рівноважний – процес, що включає не рівноважні стани.

Процес оборотний – це такий процес, який може відбуватися як у прямому, так і у зворотному напрямку, причому при поверненні у первісний стан (при зміні зовнішніх умов у протилежній послідовності) система проходить усі рівноважні стани прямого процесу, але у зворотному порядку.

Процес політропний – процес зміни стану фізичної системи, при якому протягом усього процесу зберігається сталість теплоємності.

Регенерація – використання теплоти газоподібних продуктів згоряння, що відходять, для підігрівання вхідного газоподібного палива, повітря або їх суміші.

Рециркуляція – повернення частини повітря або газу, що відходять, у сушильну камеру або топку.

Решітка соплова і робоча – сукупність певним чином розташованих у відповідному ряді соплових або робочих лопаток.

Рівноважний процес – процес переходу термодинамічної системи з одного рівноважного стану у інший, настільки повільно, що усі проміжні стани можна розглядати як рівноважні.

Рівняння стану – рівняння, що виражає зв'язок між параметрами рівноважного стану термодинамічної системи.

Реактор ядерний – обладнання, призначене для організації та підтримки керованої ланцюгової реакції розподілу ядер.

Робота – передача енергії у результаті макроскопічного впорядкованого руху мікрочастинок.

Робоче тіло – газоподібна, рідка або плазмова речовина, за допомогою якої здійснюється перетворення будь-якої енергії при одержанні механічної роботи, холоду, теплоти.

Сопло – канал, у якому відбувається розширення газу зі зменшенням і збільшенням швидкості його руху.

Сопло Лаваля – комбіноване сопло з частинами, що звужується і розширюються, яке застосовується для одержання швидкостей газу більше швидкості звуку.

Ступінь падіння тиску – відношення тисків на початку і кінці відводу теплоти від робочого тіла до холодного джерела за постійного об'єму.

Ступінь парціальності – частина кола, зайнята каналами соплових лопаток, через які проходить робоче тіло, або довжина дуги, зайнята сопловою решіткою, віднесена до довжини кола.

Ступінь підвищення тиску – відношення найбільшого тиску у циліндрі двигуна, що утворився у результаті підведення теплоти, до тиску наприкінці процесу стискання.

Ступінь попереднього розширення – відношення об'ємів наприкінці та початку підведення теплоти до робочого тіла під постійним тиском.

Ступінь стискання – відношення об'ємів у циліндрі двигуна при положеннях поршня на початку і наприкінці процесу стискання.

Ступінь скорочення об'єму – відношення об'ємів на початку і наприкінці відведення теплоти від робочого тіла до холодного джерела під постійним тиском.

Ступінь – це сукупність нерухомого соплового апарату і обертового робочого колеса (у турбіні) або обертового робочого колеса і нерухомого спрямляючого апарату (у компресорі).

Сушіння – процес видалення рідини (частіше води) з різних матеріалів.

Температура інверсії – температура, відповідно до стану газу, при якому температура газу при адіабатному дроселюванні не змінюється.

Тепловий рух – це безладний (хаотичний) рух мікрочастинок (молекул, атомів і іонів), з яких складаються усі тіла.

Теплоємність – кількість теплоти, яку необхідно підвести до тіла, щоб нагріти його на 1 градус (1°C або 1 K).

Теплота рідини – кількість теплоти, необхідна для підігрівання 1 кг води від температури $T_0 = 273\text{ K}$ до температури T_n насичення.

Теплота пароутворення – кількість теплоти, необхідна для перетворення 1 кг рідини, нагрітої до температури кипіння, у суху насичену пару під постійним тиском (і за постійної температури).

Теплота перегріву – кількість теплоти, необхідна для перетворення 1 кг сухої насиченої пари під постійним тиском у перегріту пару з температурою T_n .

Теплота процесу – кількість енергії, переданої у результаті обміну хаотичним, ненаправленим рухом мікрочастинок.

Теплота згоряння – кількість теплоти, що виділяється за повного згоряння палива.

Термодинаміка – наука про найбільш загальні властивості макроскопічних фізичних систем, що перебувають у стані термодинамічної рівноваги, і про процеси переходу між цими станами.

Термодинамічна система – це сукупність макроскопічних тіл, які можуть взаємодіяти між собою і з іншими тілами, що являють собою зовнішнє середовище, у вигляді обміну енергією або речовиною.

Термодинамічний цикл – круговий процес, що здійснюється термодинамічною системою.

Термодифузія – перенос вологи під впливом градієнта температур.

Термотрансформатор – обладнання, що дозволяє оборотним шляхом передавати теплоту від джерела з однієї температурою до джерела з іншою температурою.

Технічна термодинаміка – розділ термодинаміки, що займається застосуванням законів термодинаміки у теплотехніці.

Тиск – фізична величина, що характеризує інтенсивність нормальних сил, з якими одне тіло діє на поверхню іншого.

Тиск індикаторний середній – тиск, чисельно рівний такому умовному постійному за значенням надлишковому тиску, який, діючи на поршень, здійснює за один його хід роботу, рівну роботі газів у циліндрі за один цикл.

Тиск ефективний середній – це умовний постійний тиск у циліндрах, при якому робота, виконана у них за один такт, дорівнює ефективній роботі.

Топка – обладнання котла, призначене для спалювання органічного палива, часткового охолодження продуктів згоряння і виділення золи.

Точка роси – температура, до якої повинне охолоджуватися ненасичене вологе повітря, щоб перегріта пара, яка міститься у ньому, стала насиченою.

Турбіни парова і газова – турбіни, у яких в якості робочого тіла використовується відповідно пара і газ.

Турбокомпресор – відцентровий або осьовий лопатковий компресор для стискування і подачі повітря або газу.

Установка абсорбційна холодильна – установка, що використовує теплоту зовнішнього джерела для передачі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого тіла. У таких установках робочим тілом є розчин.

Установка газопарова (ГПУ) – комбінована установка, у якій основна частка теплоти підводиться з паливом у камеру згоряння ГПУ.

Установка газотурбінна (ГТУ) – конструктивно-об'єднана сукупність газової турбіни, компресора, камери згоряння, газоповітряного тракту, системи керування і допоміжного обладнання.

Установка газотурбінна замкненого циклу – ГТУ, у якій робоче тіло циркулює по замкненому контуру.

Установка парогазова (ПГУ) – комбінована установка, у якій основна частка теплоти підводиться з паливом у паротурбінну частину.

Установка паротурбінна – енергетична установка, що включає парові котли і парові турбіни.

Холодопродуктивність – кількість теплоти, що виділяється холодильною машиною у одиницю часу за температури нижче температури навколишнього середовища.

Цикл бінарний – термодинамічний цикл, який здійснюється двома робочими тілами.

Цикл ДВЗ робочий – сукупність різних процесів, що відбуваються у циліндрі ДВЗ у певній послідовності.

Цикл Карно – оборотний круговий процес, у якому відбувається найбільш повне перетворення теплоти у роботу (або роботи у теплоту). Термодинамічна температурна шкала основана на другому законі термодинаміки і визначається за допомогою циклу Карно.

Цикл Ренкина – ідеальний замкнений процес зміни стану робочого тіла у найпростішій паросилової установці.

Цикл холодильний – зворотний круговий процес, призначений для передачі теплоти від тіл менш нагрітих до тіл більш нагрітих.

14. ВІДПОВІДІ

14.1. Основні параметри стану і закони ідеального газу

- | | | |
|-------|--------|--------|
| 1. б; | 8. в; | 15. б; |
| 2. а; | 9. г; | 16. а; |
| 3. б; | 10. а; | 17. в; |
| 4. г; | 11. в; | 18. б; |
| 5. в; | 12. б; | 19. а; |
| 6. г; | 13. в; | 20. б; |
| 7. в; | 14. г; | 21. в. |

14.2. Суміші ідеальних газів.

Теплоємність газів і газових сумішей

- | | | |
|-------|-------|-------|
| 1. г; | 4. б; | 7. а. |
| 2. б; | 5. а; | |
| 3. в; | 6. в; | |

14.3. Термодинамічні потенціали. Перший закон термодинаміки

- | | | |
|-------|-------|--------|
| 1. а; | 6. в; | 10. г; |
| 2. г; | 7. в; | 11. б; |
| 3. в; | 8. б; | 12. а; |
| 4. б; | 9. а; | 13. в. |
| 5. а; | | |

14.4. Термодинамічні процеси

- | | | |
|--------|--------|--------|
| 1. а; | 18. а; | 35. а; |
| 2. в; | 19. г; | 36. в; |
| 3. б; | 20. а; | 37. в; |
| 4. б; | 21. а; | 38. в; |
| 5. г; | 22. г; | 39. б; |
| 6. а; | 23. в; | 40. б; |
| 7. г; | 24. а; | 41. а; |
| 8. в; | 25. а; | 42. б; |
| 9. б; | 26. а; | 43. а; |
| 10. б; | 27. в; | 44. в; |
| 11. а; | 28. в; | 45. в; |
| 12. в; | 29. б; | 46. б; |
| 13. в; | 30. в; | 47. б; |

- | | | |
|--------|--------|--------|
| 14. г; | 31. в; | 48. б; |
| 15. б; | 32. г; | 49. а; |
| 16. в; | 33. г; | 50. а; |
| 17. а; | 34. а; | 51. а. |

14.5. Водяна пара

- | | | |
|-------|--------|--------|
| 1. г; | 6. в; | 11. в; |
| 2. в; | 7. г; | 12. б; |
| 3. г; | 8. б; | 13. б; |
| 4. б; | 9. г; | 14. а; |
| 5. б; | 10. б; | 15. б. |

14.6. Вологе повітря

- | | | |
|-------|-------|-------|
| 1. а; | 4. а; | 7. в; |
| 2. б; | 5. в; | 8. г. |
| 3. в; | 6. б; | |

14.7. Витікання і дроселювання газів і пари

- | | | |
|-------|-------|-------|
| 1. г; | 4. а; | 7. г; |
| 2. г; | 5. а; | 8. г; |
| 3. г; | 6. в; | 9. б. |

14.8. Другий закон термодинаміки. Цикли теплових енергетичних процесів

- | | | |
|--------|--------|--------|
| 1. г; | 11. а; | 21. в; |
| 2. а; | 12. б; | 22. а; |
| 3. б; | 13. в; | 23. б; |
| 4. г; | 14. а; | 24. а; |
| 5. г; | 15. б; | 25. в; |
| 6. б; | 16. б; | 26. а; |
| 7. г; | 17. в; | 27. б; |
| 8. б; | 18. г; | 28. б; |
| 9. в; | 19. а; | 29. а. |
| 10. в; | 20. г; | |

14.9. Цикли холодильних установок і теплових насосів

- | | | |
|-------|-------|-------|
| 1. г; | 3. в; | 5. г. |
| 2. в; | 4. в; | |

14.10. Паливо і його спалювання

- | | | |
|-------|-------|-------|
| 1. б; | 3. б; | 5. б. |
| 2. г; | 4. в; | |

14.11. Матеріальні та теплові баланси хіміко-технологічних процесів

- | | | |
|--------|--------|--------|
| 1. а; | 19. г; | 37. в; |
| 2. г; | 20. а; | 38. г; |
| 3. б; | 21. б; | 39. а; |
| 4. в; | 22. а; | 40. б; |
| 5. б; | 23. б; | 41. в; |
| 6. а; | 24. а; | 42. а; |
| 7. в; | 25. б; | 43. б; |
| 8. а; | 26. в; | 44. в; |
| 9. в; | 27. г; | 45. г; |
| 10. б; | 28. а; | 46. б; |
| 11. г; | 29. г; | 47. б; |
| 12. а; | 30. в; | 48. а; |
| 13. б; | 31. г; | 49. б; |
| 14. г; | 32. д; | 50. а; |
| 15. в; | 33. е; | 51. б; |
| 16. а; | 34. ж; | 52. в. |
| 17. в; | 35. а; | |
| 18. б; | 36. б; | |

15. ДОДАТКИ

15.1. Грецький алфавіт

Літера	Назва	Літера	Назва	Літера	Назва
Α α	альфа	Ι ι	йота	Ρ ρ	ро
Β β	бета	Κ κ	каппа	Σ σ ζ	сигма
Γ γ	гамма	Λ λ	лямбда	Τ τ	тау
Δ δ	дельта	Μ μ	мю	Υ υ	іпсілон
Ε ε	епсілон	Ν ν	ню	Φ φ	фі
Ζ ζ	дзета	Ξ ξ	ксі	Χ χ	хі
Η η	ета	Ο ο	омікрон	Ψ ψ	псі
Θ θ	тета	Π π	пі	Ω ω	омега

15.2. Міжнародна система одиниць (СІ)

Величина	Одиниці вимірювання	Позначення
Довжина	метр	м
Маса	кілограм	кг
Час	секунда	с
Сила електричного току	ампер	А
Термодинамічна температура	кельвін	К
Кількість речовини	моль	моль
Сила світла	кандела	кд
Площа	квадратний метр	м ²
Об'єм	кубічний метр	м ³
Швидкість	метр у секунду	м/с
Прискорення	метр на секунду у квадраті	м/с ²
Сила, вага	ньютон	Н: (кг·м/с ²)
Тиск	паскаль	Па: Н/м ²
Густина	кілограм на кубічний метр	кг/м ³
Питомий об'єм	кубічний метр на кілограм	м ³ /кг
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	Дж: (Н·м)
Потужність	ватт	Вт
Масова витрата	кілограм на секунду	кг/с
Ентропія	джоуль на кельвін	Дж/К
Питома масова теплоємність	джоуль на кілограм и кельвін	Дж/(кг·К)
Теплота фазового перетворення	джоуль на кілограм	Дж/кг

15.3. Десяткові приставки

<i>Множник</i>	<i>Приставка</i>	<i>Позначення</i>
10^{12}	Тера	Т
10^9	Гіга	Г
10^6	Мега	М
10^3	кіло	к
10^2	гекто	г
10^1	дека	да
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	мілі	м
10^{-6}	мікро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	піко	п

15.4. Переведення деяких величин у одиниці системи СІ

<i>Назва величини</i>	<i>Система одиниць МКГСС</i>	<i>Позасистемна одиниця</i>	<i>Система СІ</i>
Маса	1кгс·с ² /м	—	9,80665 кг
Сила	1кгс	—	9,80665 Н
Густина	1 кгс·с ² /м ⁴	—	9,80665 кг/м ³
Робота	1 кгс·м	1/427 ккал	9,80665 Дж
Теплота, ентальпія, внутрішня енергія	—	1ккал = = 1/860 кВт·ч	4187 Дж
Енергія	1кВт·ч	860 ккал	3600·10 ³ Дж

15.5. Переведення одиниць виміру тиску

	<i>Па (Н/м²)</i>	<i>бар</i>	<i>атм</i>	<i>мм. рт. ст.</i>	<i>мм. в. ст.</i>	<i>м в. ст.</i>	<i>кгс/см²</i>
Па (Н/м ²)	1	10 ⁻⁵	9,87·10 ⁻⁶	0,0075	0,1	10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁵
бар	10 ⁵	1	0,987	750	1,0197·10 ⁴	10,197	1,0197
атм	1,01·10 ⁵	1,013	1	759,9	10332	10,332	1,03
мм. рт. ст.	133,3	1,33·10 ⁻³	1,32·10 ⁻³	1	13,3	0,013	1,36·10 ⁻³
мм. в. ст.	10	0,000097	9,87·10 ⁻⁵	0,075	1	0,001	1,02·10 ⁻⁴
м в. ст.	10 ⁴	0,097	9,87·10 ⁻²	75	1000	1	0,102
кгс/см ²	9,8·10 ⁴	0,98	0,97	735	10000	10	1

15.6. Основні термодинамічні параметри газів

Назва	Символ	Молярна маса M , кг/кмоль	Густина за нормаль- них умов, кг/м^3	Питома газова постій- на	Тепло- ємність c_p за с.у., $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	Показ- ник адіабат- ти
Ідеальний газ	—	—	—	—	—	—
Азот	N ₂	28,0134	1,2504	296,8	29,12	1,41
Аміак	NH ₃	17,0304	0,7718	488,3	—	1,313
Аргон	Ar	39,948	1,784	208	20,79	—
Ацетилен	C ₂ H ₂	26,038	1,1715	—	319,4	—
Вода (пара)	H ₂ O	18,0152	(0,654)	461,5	—	1,33
Водень	H ₂	2,0158	0,8988	4125	—	1,408
Повітря (сухе)	—	28,983	1,293	287,2	29,2	—
Гелій	He	4,0026	0,17846	2077,4	—	—
Двоокис азоту	NO ₂	46,0055	2,05	—	—	—
Двоокис сірки	SO ₂	64,059	2,931	130	—	—
Двоокис вуглецю	CO ₂	44,0098	1,977	188,9	—	1,305
Кисень	O ₂	31,9986	1,429	259,8	29,83	1,398
Криптон	Kr	83,8	3,749	—	20,79	—
Метан	CH ₄	16,043	0,7176	518,3	—	1,315
Неон	Ne	20,179	0,8999	—	20,79	—
Оксид вуглецю	CO	28,0104	1,2505	296,9	—	1,401
Оксид азоту	NO	30,0061	1,3402	—	—	—
Пропан	C ₃ H ₈	44,096	2,011	189	—	—
Пропилен	C ₃ H ₆	42,08	1,9129	—	—	—
Сульфід водню	H ₂ S	34,076	1,5355	—	—	—
Хлор	Cl ₂	70,908	3,21	117,3	—	—
Хлорид водню	HCl	36,461	1,6422	—	—	—
Етан	C ₂ H ₆	30,069	1,355	—	—	—
Етилен	C ₂ H ₄	28,054	1,2611	296,5	—	—

15.7. Теплоємності різних газів

Тем- пера- тура $t, ^\circ\text{C}$	Молярна теплоємність, $\text{кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$				Масова теплоємність, $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$		Об'ємна теплоємність, $\text{кДж/(м}^3\cdot\text{К)}$	
	μ_{c_p}	μ_{c_v}	$\mu_{c_{pm}}$	$\mu_{c_{vm}}$	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кисень (O ₂)								
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3057	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3178	0,9466

1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9651	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1100	36,216	27,901	33,380	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1600	37,480	29,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752
1800	37,945	29,630	34,834	26,519	1,0886	0,8286	1,5541	1,1832
1900	38,175	29,860	35,006	26,691	1,0940	0,8340	1,5617	1,1907
2000	38,406	30,091	35,169	26,854	1,0990	0,8390	1,5692	1,1978
2100	38,636	30,321	35,328	27,043	1,1041	0,8441	1,5759	1,2050
2200	39,858	30,543	35,483	27,168	1,1087	0,8491	1,5830	1,2121
2300	39,080	30,765	35,634	27,319	1,1137	0,8537	1,5897	1,2188
2400	39,293	30,978	35,785	27,470	1,1183	0,8583	1,5964	1,2255
2500	39,502	31,187	35,927	27,612	1,1229	0,8629	1,6027	1,2318
2600	39,708	31,393	36,069	27,754	1,1271	0,8675	1,6090	1,2380
2700	39,909	31,594	36,207	27,892	1,1313	0,8717	1,6153	1,2443
<i>Азот (N₂)</i>								
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1600	35,757	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1700	35,937	27,612	32,883	25,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961
1800	36,100	27,775	33,055	24,740	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1900	36,247	27,922	33,218	24,903	1,1857	0,8889	1,4821	1,1112
2000	36,377	28,052	33,373	25,058	1,1911	0,8943	1,4888	1,1179
2100	36,494	28,169	33,520	25,205	1,1966	0,8997	1,4955	1,1246
2200	36,603	28,278	33,658	25,313	1,2012	0,9048	1,5018	1,1304
2300	36,703	28,378	33,787	25,472	1,2058	0,9094	1,5072	1,1363
2400	36,795	28,470	33,909	25,594	1,2104	0,9136	1,5127	1,1417
2500	36,879	28,554	34,022	25,707	1,2142	0,9177	1,5177	1,1468
<i>Оксид вуглецю (CO)</i>								
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7494	1,0371	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,0634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3574	0,9864
700	33,025	24,710	30,752	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	0,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8338	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	32,427	24,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948
1600	36,040	27,725	33,051	24,736	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1700	36,203	27,888	33,231	24,916	1,1865	0,8893	1,4825	1,1116
1800	36,350	28,035	33,402	25,087	1,1924	0,8956	1,4901	1,1191
1900	36,480	28,165	33,561	25,246	1,1983	0,9014	1,4972	1,1262
2000	36,597	28,282	33,708	25,393	1,2033	0,9064	1,5039	1,1329
2100	36,706	28,391	33,850	25,535	1,2083	0,9115	1,5102	1,1392
2200	36,802	28,487	33,980	25,665	1,2129	0,9161	1,5160	1,1451
2300	36,894	28,579	34,106	25,791	1,2175	0,9207	1,5215	1,1505
2400	36,978	28,663	34,223	25,908	1,2217	0,9249	1,5269	1,1560
2500	37,053	28,738	34,336	26,021	1,2259	0,9291	1,5320	1,1610

<i>Водень (H_2)</i>								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	28,617	20,302	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2765	0,9056
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,186	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,3050	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	29,944	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	30,107	21,792	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,890	24,275	30,288	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964
1600	33,762	25,447	30,832	22,517	15,294	11,169	1,3754	1,0044
1700	34,114	28,799	31,012	22,697	15,383	11,258	1,3833	1,0124
1800	34,445	26,130	31,192	22,877	15,472	11,347	1,3917	1,0207
1900	34,763	26,448	31,372	23,057	15,561	11,437	1,3996	1,0287
2000	35,056	26,741	31,548	23,233	15,649	11,524	1,4076	1,0366
2100	35,332	27,017	31,723	23,408	15,736	11,611	1,4151	1,0442
2200	35,605	27,290	31,891	23,576	15,819	11,694	1,4227	1,0517
2300	35,852	27,537	32,058	23,743	15,902	11,798	1,4302	1,0593
2400	36,090	27,775	32,222	23,907	15,983	11,858	1,4373	1,0664
2500	36,316	28,001	32,385	24,070	16,064	11,937	1,4449	1,0739
2600	36,530	28,215	32,540	24,225	16,141	12,016	1,4516	1,0806
2700	36,730	28,416	32,691	24,376	16,215	12,091	1,4583	1,0873
<i>Вуглекислий газ (CO_2)</i>								
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,235	34,935	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,815	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8608	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0862	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	1,1995	1,0107	2,3555	1,9845
1700	60,022	51,707	53,218	44,903	1,2091	1,0203	2,3743	2,0034
1800	60,269	51,954	53,604	45,289	1,2179	1,0291	2,3915	2,0205
1900	60,478	52,163	53,959	45,644	1,2259	1,0371	2,4074	2,0365
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	1,2334	1,0446	2,4221	2,0511
2100	60,801	52,489	54,596	46,281	1,2405	1,0517	2,4359	2,0649
2200	60,918	52,603	54,881	46,556	1,2468	1,0580	2,4484	2,0778
2300	61,006	52,691	55,144	46,829	1,2831	1,0639	2,4602	2,0892
2400	61,060	52,745	55,301	47,076	1,2586	1,0697	2,4710	2,1001
2500	61,085	52,770	55,617	47,302	1,2636	1,0748	2,4811	2,1101
<i>Водяна пара (H₂O)</i>								
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,964	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	35,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	26,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5808	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,668/	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7155	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	2,3346	1,8728	1,8761	1,5052
1700	51,133	42,818	42,576	34,261	2,3630	1,9016	1,8996	1,5286
1800	51,782	43,467	43,070	34,755	4,3907	1,9293	1,9213	1,5504
1900	52,377	44,062	43,539	35,224	2,4166	1,9552	1,9423	1,5713
2000	52,930	44,615	43,995	35,680	2,4422	1,9804	1,9628	1,5918
2100	53,449	45,134	44,435	36,120	2,4664	2,0051	1,9824	1,6115
2200	53,930	45,615	44,853	36,538	2,4895	2,0281	2,0009	1,6299

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2300	54,370	46,055	45,255	36,940	2,5121	2,0503	2,0189	1,6479
2400	24,780	46,465	45,644	37,330	2,5334	2,0720	2,0365	1,6655
2500	55,161	46,846	46,017	37,702	2,5544	2,0926	2,0528	1,6818
2600	55,525	47,210	46,381	38,066	2,5745	2,1131	2,0691	1,6982
2700	55,864	47,549	46,729	38,414	2,5937	2,1323	2,0864	1,7137
2800	56,187	47,872	47,060	38,745	2,6121	2,1508	2,0997	1,7287
2900	56,488	48,173	47,378	39,063	2,6297	2,1683	2,1135	1,7425
<i>Сірчаний газ (SO₂)</i>								
0	38,85	30,52	38,85	30,52	0,607	0,477	1,733	1,361
100	42,41	34,08	40,65	32,32	0,636	0,507	1,813	1,440
200	45,56	37,22	42,33	34,00	0,662	0,532	1,888	1,516
300	48,23	39,90	43,88	35,55	0,687	0,557	1,955	1,587
400	50,24	41,91	45,22	36,89	0,708	0,578	2,018	1,645
500	51,71	43,38	46,39	38,06	0,724	0,595	2,068	1,709
600	52,88	44,55	47,35	39,02	0,737	0,607	2,114	1,742
700	53,76	45,43	48,23	39,90	0,754	0,624	2,152	1,779
800	54,43	46,10	48,94	40,51	0,762	0,632	2,181	1,813
900	55,01	46,68	49,61	41,28	0,775	0,645	2,215	1,842
1000	55,43	47,10	50,16	41,83	0,783	0,653	2,236	1,867
1100	55,77	47,44	50,66	42,33	0,791	0,662	2,261	1,888
1200	56,06	47,73	51,08	42,75	0,795	0,666	2,278	1,905
<i>Повітря</i>								
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,226	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0116	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,2189	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9715
600	32,301	23,988	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,589	23,283	1,0907	0,8/39	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	31,862	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618
1300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	35,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	35,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	1,1501	0,8633	1,4867	1,1158
1900	36,509	28,194	33,482	25,167	1,1560	0,8688	1,4939	1,1229
2000	36,655	28,340	33,641	25,326	1,1610	0,8742	1,5010	1,1296
2100	36,798	28,483	33,787	25,472	1,1664	0,8792	1,5072	1,1363
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	1,1710	0,8843	1,5135	1,1426
2300	37,053	28,738	34,060	25,745	1,1757	0,8889	1,5194	1,1484
2400	37,170	28,855	34,185	25,870	1,1803	0,8930	1,5253	1,1543
2500	37,279	28,964	34,307	25,992	1,1840	0,8970	1,5303	1,1593

15.8. Середня теплоємність газів у межах температур від 0 до 1500 °С (лінійна залежність)

Газ	Масова теплоємність, Дж/(кг·К)	Об'ємна теплоємність, кДж/(м³·К)
Повітря	$C_{vm0}^t = 0,7088 + 9,3 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{vm0}^t = 0,9157 + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot t$
	$C_{pm0}^t = 0,9956 + 9,3 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{pm0}^t = 1,287 + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot t$
Водень	$C_{vm0}^t = 10,12 + 5,945 \cdot 10^{-4} \cdot t$	$C_{vm0}^t = 0,9094 + 5,23 \cdot 10^{-5} \cdot t$
	$C_{pm0}^t = 14,33 + 5,945 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{pm0}^t = 1,28 + 5,23 \cdot 10^{-5} \cdot t$
Азот	$C_{vm0}^t = 0,7304 + 8,955 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{vm0}^t = 0,9131 + 1,107 \cdot 10^{-4} \cdot t$
	$C_{pm0}^t = 1,032 + 8,955 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{pm0}^t = 1,306 + 1,107 \cdot 10^{-4} \cdot t$
Кисень	$C_{vm0}^t = 0,6594 + 1,065 \cdot 10^{-4} \cdot t$	$C_{vm0}^t = 0,943 + 1,577 \cdot 10^{-4} \cdot t$
	$C_{pm0}^t = 0,919 + 1,065 \cdot 10^{-4} \cdot t$	$C_{pm0}^t = 1,313 + 1,577 \cdot 10^{-4} \cdot t$
Оксид вуглецю	$C_{vm0}^t = 0,7331 + 9,681 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{vm0}^t = 0,9173 + 1,21 \cdot 10^{-4} \cdot t$
	$C_{pm0}^t = 1,035 + 9,681 \cdot 10^{-5} \cdot t$	$C_{pm0}^t = 1,291 + 1,21 \cdot 10^{-4} \cdot t$
Водяна пара	$C_{vm0}^t = 1,372 + 3,111 \cdot 10^{-4} \cdot t$	$C_{vm0}^t = 1,102 + 2,498 \cdot 10^{-4} \cdot t$
	$C_{pm0}^t = 1,833 + 3,111 \cdot 10^{-4} \cdot t$	$C_{pm0}^t = 1,473 + 2,498 \cdot 10^{-4} \cdot t$

15.9. Властивості води

Темпе- ратура, °С	Тиск насиченої пари, Па	Густина, кг/м³	Питома ентальпія, кДж/кг	Теплоємність, кДж/(кг·К)	Динамічна в'язкість, кг/(м·с)
1	2	3	4	5	6
0	611	999,82	0,06	4,217	0,001792
5	872	1000,00	21,11	4,202	0,001520
10	1227	999,77	42,09	4,192	0,001308
15	1704	999,19	63,04	4,186	0,001139
20	2337	998,29	83,95	4,182	0,001003
25	3166	997,13	104,86	4,180	0,000891
30	4242	995,71	125,75	4,178	0,000798

1	2	3	4	5	6
35	5622	994,08	146,64	4,178	0,000720
40	7375	992,25	167,54	4,179	0,000653
35	5622	994,08	146,64	4,178	0,000720
40	7375	992,25	167,54	4,179	0,000653
45	9582	990,22	188,43	4,180	0,000596
50	12335	988,02	209,33	4,181	0,000547
55	15740	985,65	230,24	4,183	0,000504
60	19919	983,13	251,16	4,185	0,000467
65	25008	980,45	272,09	4,187	0,000434
70	31161	977,63	293,03	4,190	0,000404
75	38548	974,68	313,99	4,193	0,000378
80	47359	971,60	334,96	4,196	0,000355
85	57803	968,39	355,95	4,200	0,000334
90	70108	965,06	376,96	4,205	0,000315
95	84525	961,62	398,00	4,210	0,000298
100	101325	958,05	419,06	4,216	0,000282

15.10. Властивості повітря

<i>Темпе- ратура, °C</i>	<i>Густина, кг/м³</i>	<i>Теплоємність кДж/ (кг·K)</i>	<i>Тепло- провідність Вт/(м·K)</i>	<i>Число Прандтля Pr</i>
– 150	2,793	1,026	0,0116	0,76
– 100	1,980	1,009	0,0160	0,74
– 50	1,534	1,005	0,0204	0,725
0	1,293	1,005	0,0243	0,715
20	1,205	1,005	0,0257	0,713
40	1,127	1,005	0,0271	0,711
60	1,067	1,009	0,0285	0,709
80	1,000	1,009	0,0299	0,708
100	0,946	1,009	0,0314	0,703
120	0,898	1,013	0,0328	0,70
140	0,854	1,013	0,0343	0,695
160	0,815	1,017	0,0358	0,69
180	0,779	1,022	0,0372	0,69
200	0,746	1,026	0,0386	0,685
250	0,675	1,034	0,0421	0,68
300	0,616	1,047	0,0454	0,68
350	0,566	1,055	0,0485	0,68
400	0,524	1,068	0,0515	0,68

15.11. Фізичні властивості холодоагентів

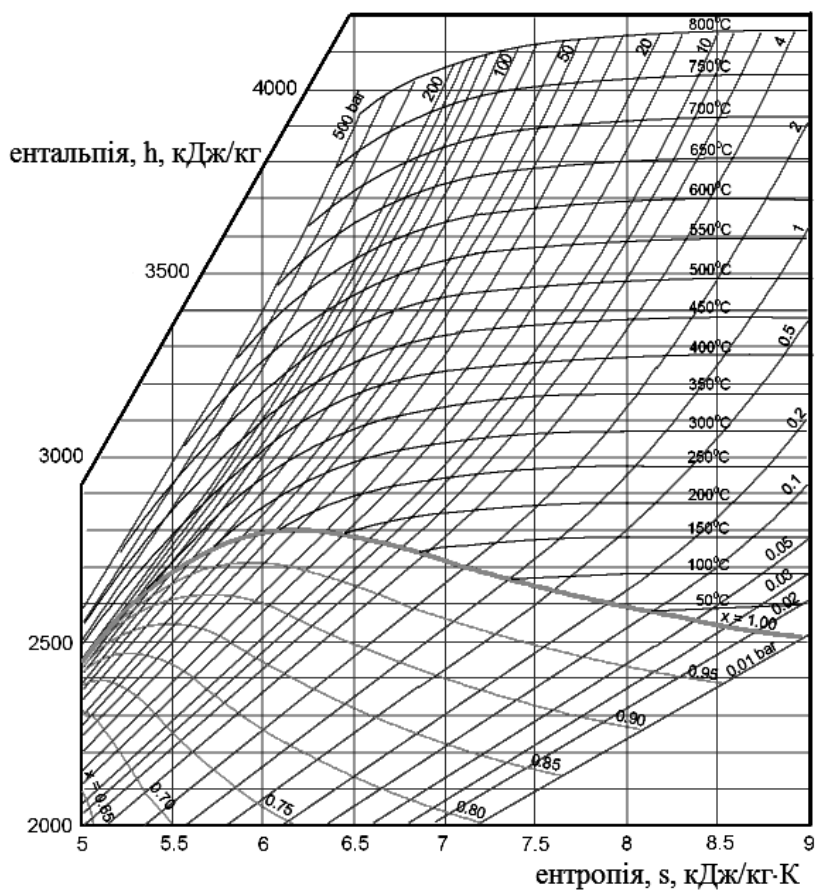
<i>Холодоагент</i>	<i>Символьне позначення</i>	<i>Хімічна формула</i>	<i>Нормальна температура кипіння за 760 мм.рт.ст., °C</i>	<i>Критична температура, °C</i>	<i>Критичний тиск, МПа</i>	<i>Температура замерзання, °C</i>
Вода	R718	H ₂ O	+ 100	374,15	22,11	– 0,1
Аміак	R717	NH ₃	– 33,3	132,4	11,28	– 77,7
Вуглекислота	R744	CO ₂	– 78,9	31,0	7,36	– 56,6
Хлорметил	–	CH ₃ Cl	– 23,74	143,1	6,68	– 97,6
Фреон–11	R11	CFCl ₃	+ 23,7	198,0	4,37	– 111,0
Хладон–12 (фреон–12)	R12	CF ₂ Cl ₂	– 29,8	112,0	4,11	– 155,0
Фреон–13	R13	CF ₂ Cl ₂	– 81,5	28,78	3,85	– 180,0
Хладон-22 (фреон–22)	R22	CHF ₂ Cl	– 40,8	96,0	4,93	– 160,0
Фреон–113	R113	C ₂ F ₃ Cl ₃	+ 47,6	214,1	3,41	– 36,6
Фреон–134a	R134a	CH ₂ FCF ₃	– 26,1	101,1	4,06	– 96,6
Фреон–142	R142	C ₂ H ₃ F ₂ Cl	– 9,21	137,1	3,92	– 130,8
Фреон–13B1	R13B1	CF ₃ Br	– 57,8	67,0	6,56	– 143,2
Хладон–502 (фреон–502)	R502	CHF ₂ Cl C ₂ F ₅ Cl	– 45,6	90,1	4,1	–

15.12. Характеристики холодоагенту R134a на лінії насичення

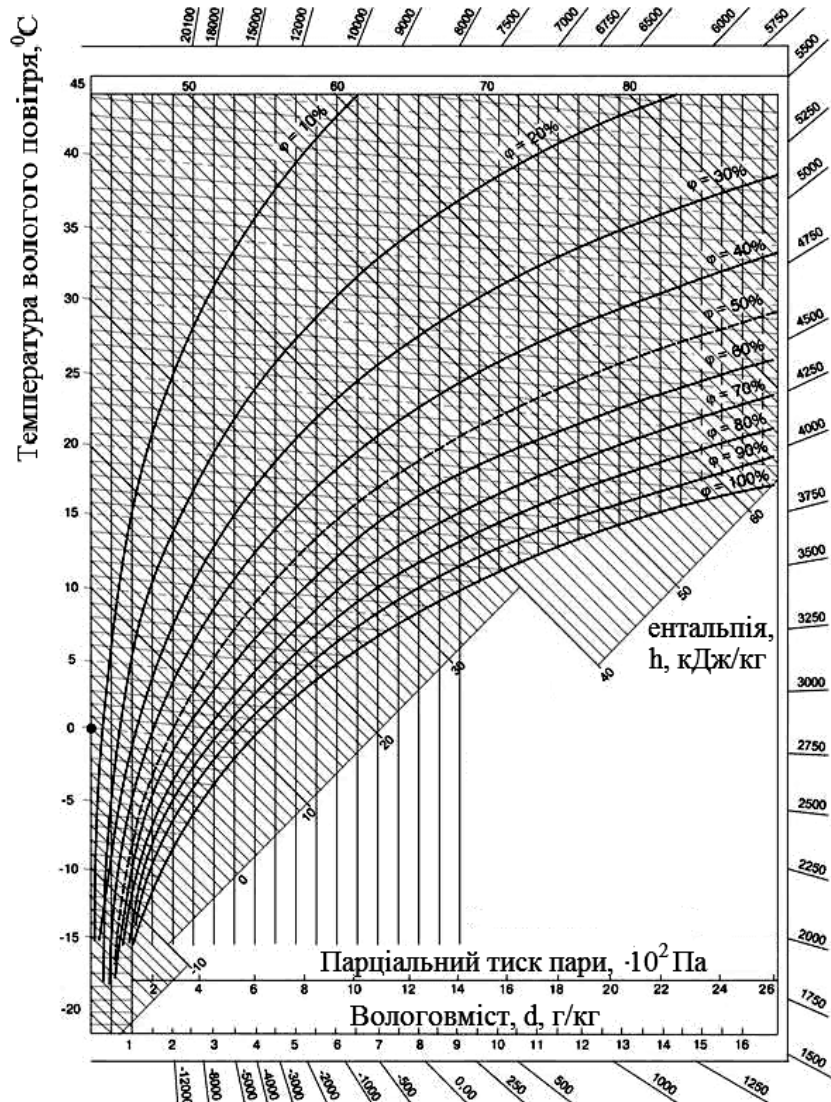
<i>Температура, °C</i>	<i>Абсолютний тиск, 10⁵ Па</i>	<i>Питомий об'єм, дм³/кг</i>		<i>Густина, кг/м³</i>		<i>Питома ентальпія кДж/кг</i>		<i>Питома теплота пароутворення,</i>	<i>Питома ентропія, кДж/(кг K)</i>	
		<i>рідина</i>	<i>пара</i>	<i>рідина</i>	<i>пара</i>	<i>рідина</i>	<i>пара</i>		<i>рідина</i>	<i>пара</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
–50	0,295	0,693	604,615	1442,547	1,654	136,0	367,3	231,3	0,742	1,779
–45	0,391	0,7	463,457	1428,411	2,158	142,3	370,5	228,2	0,770	1,770
–40	0,512	0,707	360,036	1414,175	2,777	148,5	373,6	225,0	0,797	1,762
–35	0,661	0,714	283,15	1399,816	3,532	154,9	376,7	221,8	0,824	1,755
–30	0,844	0,722	225,21	1385,306	4,44	161,2	379,7	218,5	0,850	1,749
–25	1,064	0,73	180,995	1370,619	5,525	167,6	382,8	215,2	0,876	1,743
–20	1,327	0,738	146,855	1355,725	6,809	174,0	385,8	211,8	0,901	1,738
–15	1,638	0,746	120,204	1340,593	8,319	180,4	388,8	208,4	0,927	1,734

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-10	2,004	0,755	99,186	1325,19	10,082	186,9	391,7	204,8	0,951	1,730
-5	2,431	0,764	82,45	1309,479	12,129	193,4	394,6	201,2	0,976	1,726
0	2,925	0,773	69,005	1293,424	14,492	200,0	397,4	197,4	1,000	1,723
5	3,492	0,783	58,111	1276,98	17,209	206,6	400,2	193,6	1,024	1,720
10	4,141	0,794	49,214	1260,104	20,32	213,3	403,0	189,6	1,048	1,717
15	4,878	0,805	41,893	1242,744	23,87	220,1	405,6	185,5	1,071	1,715
20	5,710	0,816	35,827	1224,845	27,912	227,0	408,2	181,3	1,095	1,713
25	6,647	0,829	30,766	1206,345	32,503	233,9	410,8	176,8	1,118	1,711
30	7,695	0,842	26,517	1187,173	37,712	241,0	413,2	172,2	1,141	1,709
35	8,863	0,857	22,927	1167,25	43,617	248,1	415,6	167,4	1,164	1,707
40	10,159	0,872	19,876	1146,481	50,313	255,4	417,8	162,4	1,187	1,706
45	11,594	0,889	17,268	1124,757	57,911	262,9	419,9	157,0	1,210	1,704
50	13,176	0,907	15,026	1101,943	66,551	270,5	421,9	151,3	1,234	1,702

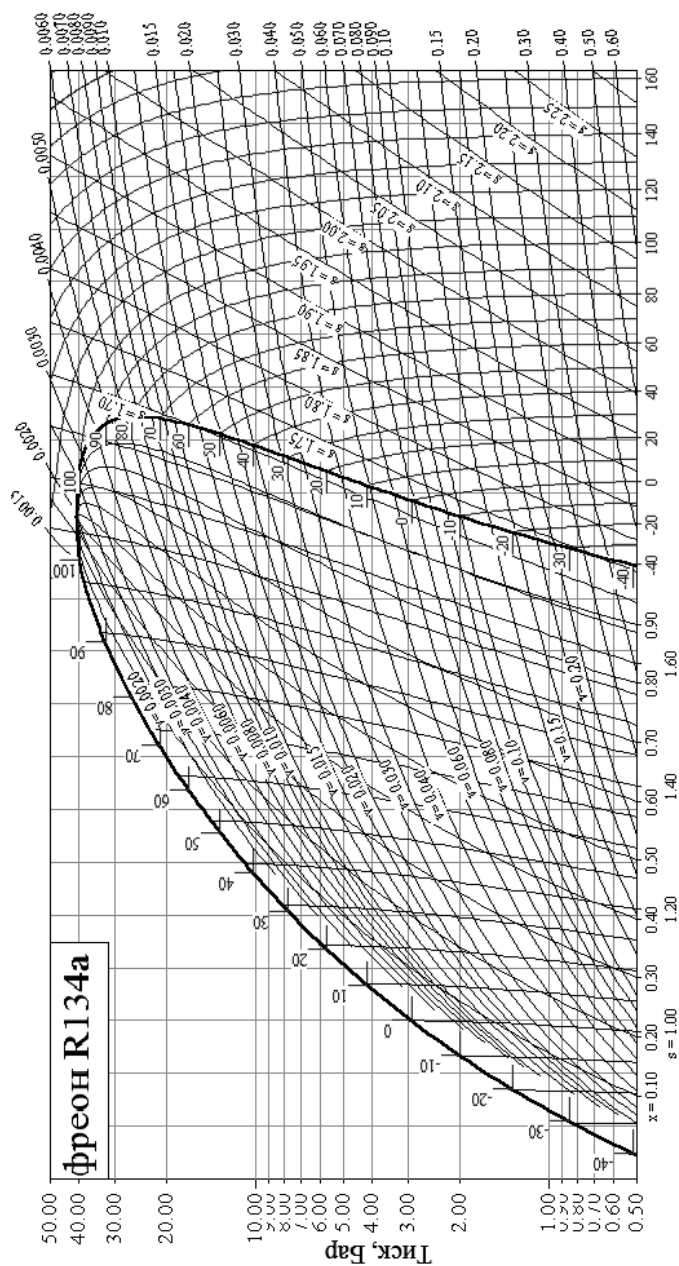
15.13. h s – діаграма для водяної пари



15.14. $h-d$ – діаграма для повітря



15.15. p-h – діаграма для фреону



140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340 360 380 400 420 440 460 480 500 520 540 560

15.16. Параметри насиченої водяної пари (за температурами)

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$p, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$v', \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$v'', \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$h', \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'', \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s', \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$s'', \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0062	0,0010002	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1	0	9,1544
5	0,0089	0,0010001	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7	0,0762	9,0241
10	0,0125	0,0010004	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4	0,1510	8,8994
15	0,0174	0,0010010	77,9	0,01283	62,85	2522,4	2459,5	0,2244	8,8706
20	0,0238	0,0010018	57,8	0,01729	83,80	2532,0	2448,2	0,2964	8,6665
25	0,0323	0,0010030	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9	0,3672	8,5670
30	0,0433	0,0010044	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6	0,4366	8,4523
35	0,0573	0,0010061	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414,3	0,5049	8,3519
40	0,0752	0,0010079	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0	0,5723	8,2559
45	0,0977	0,0010099	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3	0,6384	8,1638
50	0,1258	0,0010121	12,054	0,0830	209,50	2589,5	2380,0	0,7038	8,0753
55	0,1605	0,0010145	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2	0,7679	7,9901
60	0,2031	0,0010171	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9	0,8311	7,9084
65	0,2550	0,0010199	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345,2	0,8934	7,8297
70	0,3177	0,0010228	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333,0	0,9549	7,7544
75	0,393	0,0019258	4,139	0,2416	314,3	2636	2321	1,0167	7,6815
80	0,483	0,0010290	3,414	0,2929	335,2	2644	2310	1,0753	7,6116
85	0,590	0,0010324	2,832	0,3531	356,2	2653	2297	1,1342	7,5438
90	0,715	0,0010359	2,365	0,4229	377,1	2662	2285	1,1925	7,4787
95	0,862	0,0010396	1,985	0,5039	398,1	2671	2273	1,2502	7,4158
100	1,033	0,0010435	1,675	0,5970	419,0	2679	2260	1,3071	7,3547

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
105	1,232	0,0010474	1,421	0,7036	440,4	2687	2248	1,3632	7,2959
110	1,461	0,0010515	1,212	0,8254	461,3	2696	2234	1,4184	7,2387
115	1,724	0,0010559	1,038	0,9635	482,7	2704	2221	1,4733	7,1832
120	2,025	0,0010603	0,893	1,1199	504,1	2711	2207	1,5277	7,1298
125	2,367	0,0010649	0,7715	1,296	525,4	2718	2194	1,6814	7,0777
130	2,755	0,0010697	0,6693	1,494	546,8	2726	2179	1,6345	7,0272
135	3,192	0,0010747	0,5831	1,715	568,2	2733	2165	1,6869	6,9781
140	3,685	0,0010798	0,5096	1,962	589,5	2740	2150	1,7392	6,9304
145	4,238	0,0010861	0,4469	2,238	611,3	2747	2125	1,7907	6,8839
150	4,855	0,0010906	0,3933	2,543	632,7	2753	2120	1,8418	6,8383
160	6,303	0,0011021	0,3075	3,252	654,1	2765	2089	1,9427	6,7508
170	8,080	0,0011141	0,2431	4,113	719,8	2776	2056	2,0417	6,6666
180	10,23	0,0011275	0,1944	5,145	763,8	2785	2021	2,1395	6,5858
190	12,80	0,0011415	0,1568	6,378	808,3	2792	1984	2,2357	6,5074
200	15,85	0,0011565	0,1276	7,840	852,7	2798	1945	2,3308	6,4318
210	19,55	0,0011726	0,1045	9,567	897,9	2801	1904	2,4246	6,3577
220	23,66	0,0011900	0,0862	11,600	943,2	2803	1860	2,5179	6,2849
230	28,53	0,0012087	0,07155	13,98	989,3	2802	1813	2,6101	6,2133
240	34,13	0,0012291	0,05967	16,76	1035	2799	1763	2,7021	6,1425
250	40,55	0,0012512	0,04998	20,01	1082	2792	1710	2,7934	6,0721
260	47,85	0,0012755	0,04199	23,82	1130	2783	1653	2,8851	6,0013
270	56,11	0,003023	0,03538	28,27	1178	2770	1593	2,9761	5,3297
280	65,42	0,0013321	0,02988	33,47	1226	2754	1528	3,0631	5,8573
290	75,88	0,0013655	0,02525	39,60	1275	2734	1459	3,1611	5,7827

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	87,6	0,0014036	0,02131	46,93	1327	2710	1384	3,2548	5,7049
310	100,7	0,0014470	0,01799	55,59	1380	2682	1302	3,3508	5,6233
320	115,2	0,0014990	0,01516	65,95	1437	2650	1213	3,4495	5,5353
330	131,3	0,0015620	0,01273	78,53	1498	2613	1117	3,5522	5,4412
340	149,0	0,0016390	0,01064	93,98	1564	2571	1009	3,6065	5,3361
350	168,6	0,0017410	0,00884	113,2	1638	2519	881,2	3,7786	5,2117
360	190,3	0,0018940	0,00716	139,6	1730	2444	713,6	3,9162	5,0530
370	214,5	0,002220	0,00585	171,0	1890	2304	411,6	4,1137	4,7951

15.17. Параметри насиченої водяної пари (за тисками)

$p, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v', \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$v'', \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$h', \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$h'', \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\gamma, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s', \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$s'', \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0010	6,29	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,0015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1988	8,827
0,0020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,0025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,0030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3548	8,576
0,0035	26,592	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,0040	28,979	0,0010041	34,31	0,02873	121,42	2534	2433	0,4225	8,473
0,0045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,0050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0060	35,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,0070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,271
0,0080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,90	2576	2402	0,5927	8,227
0,0090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,010	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,011	47,72	0,0010111	13,40	0,07472	199,7	2588	2388	0,6740	8,116
0,012	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0,013	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,014	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,015	54,00	0,0010140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0,020	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,025	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,030	69,12	0,0010223	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,040	75,88	0,0010265	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,050	81,35	0,0010301	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593
0,060	85,95	0,0010303	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,521
0,070	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,481
0,080	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,090	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0,100	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
0,11	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
0,12	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
0,13	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
0,14	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,15	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
0,16	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
0,17	116,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
0,18	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
0,19	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
0,20	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
0,21	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
0,22	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
0,23	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081
0,24	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	525,1	2715	2185	1,5929	7,067
0,25	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
0,26	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,5	2719	2178	1,6210	7,040
0,27	128,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2176	1,6340	7,027
0,28	131,20	0,0010709	0,6461	1,458	551,4	2722	2171	1,6470	7,015
0,29	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167	1,6600	7,003
0,30	133,53	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,673	6,982
0,31	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
0,32	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
0,33	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	578,8	2730	2154	1,706	6,961
0,34	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
0,35	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
0,36	139,87	0,0010767	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
0,37	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
0,38	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,39	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
0,40	143,82	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
0,41	144,51	0,0010845	0,4512	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
0,42	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
0,43	146,25	0,0010865	0,4312	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
0,44	147,09	0,0010874	0,4227	2,365	618,6	2743	2123	1,812	6,865
0,45	147,92	0,0010883	0,4131	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
0,50	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,60	150,84	0,0011007	0,3166	3,168	670,5	2757	2086	1,981	6,721
0,70	164,96	0,0011081	0,2726	3,566	697,3	2764	2067	1,992	6,708
0,80	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
0,90	175,35	0,0011213	0,2148	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
1,0	178,88	0,0011277	0,1846	5,138	752,7	2778	2016	2,134	6,587
1,1	184,05	0,0011331	0,1776	5,634	761,1	2781	2000	2,178	6,554
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	791,3	2785	1987	2,214	6,523
1,3	191,60	0,0011438	0,1612	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
1,4	196,04	0,0011490	0,1408	7,103	839,0	2790	1960	2,284	6,469
1,5	198,28	0,0011589	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
1,6	201,36	0,0011606	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,314	6,422
1,7	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
1,8	207,30	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
1,9	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
2,0	212,37	0,0011766	0,0958	10,041	908,6	2799	1891	2,447	6,340
2,1	214,84	0,0011809	0,09492	10,540	919,8	2800	1880	2,470	6,322

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,2	217,24	0,0011851	0,09068	11,030	930,9	2801	1870	2,492	6,305
2,3	219,55	0,0011892	0,08679	11,520	941,5	2801	1860	2,514	6,288
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	12,010	951,8	2802	1850	2,534	6,272
2,5	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1834	2,573	6,242
2,7	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
2,9	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,648	6,186
3,2	237,44	0,0012239	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
3,4	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
3,6	244,15	0,0012380	0,05543	18,04	1057,3	2802	1745	2,740	6,113
3,8	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
4,2	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
4,4	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
4,6	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
4,8	261,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
5,5	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,975	5,930
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
6,5	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,6	3,076	5,851
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
7,5	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,177	5,779

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
8,5	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
9,5	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
10,0	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
11,0	318,04	0,0014890	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
12,0	324,63	0,0015270	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
13,0	330,81	0,0015670	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
14,0	336,63	0,0016110	0,01149	67,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
15,0	342,11	0,0016580	0,01035	96,62	1610,0	2611	1001,1	3,684	5,310
16,0	347,32	0,0017100	0,009318	107,3	1650,0	2582	932,0	3,746	5,247
17,0	352,26	0,0017680	0,008382	119,3	1690,0	2542	858,3	3,807	5,177
18,0	356,96	0,0018370	0,007504	133,2	1732,0	2510	778,2	3,871	5,107
19,0	361,44	0,0019210	0,006680	149,7	1776,0	2466	690,0	3,938	5,027
20,0	365,71	0,0020400	0,005850	170,9	182,0	2410	583,0	4,015	4,928
21,0	369,79	0,0022100	0,004980	200,7	1888,0	2336	448,0	4,108	4,803
22,0	373,7	0,0027300	0,003670	272,5	2016,0	2168	152,0	4,303	4,591

15.18. Вода і перегріта пара

Параметри надані у одиницях системи СІ (число від ступеневої лінії відносяться до води)

$P, \text{МПа}$	$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0,004	v	0,0010018	36,12	38,45	40,75	43,07	45,39	47,69	50,01	52,31	54,63
	i	83,7	2574	2612	2650	2688	2726	2764	2803	2841	2880
	s	0,2964	8,537	8,651	8,762	8,857	8,966	9,060	9,150	9,238	9,321
0,008	v	0,0010018	0,0010079	19,19	20,34	21,50	22,66	23,82	24,97	26,13	27,29
	i	83,7	167,5	2612	2650	2688	2726	2764	2802	2841	2880
	s	0,2964	0,5715	8,331	8,441	8,546	8,645	8,740	8,830	8,917	9,000
0,010	v	0,0010018	0,0010079	15,35	16,27	17,20	18,13	19,06	19,98	20,90	21,83
	i	83,7	167,5	2611	2649	2688	2726	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,227	8,337	8,442	8,542	8,636	8,727	8,814	8,897
0,012	v	0,0010018	0,0010079	12,78	13,55	14,33	15,10	15,87	16,64	17,42	18,19
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2764	2802	2841	2879
	s	0,2964	0,5715	8,143	8,253	8,358	8,457	8,552	8,643	8,730	8,813
0,014	v	0,0010018	0,0010079	10,95	11,61	12,27	12,94	13,60	14,26	14,92	15,58
	i	83,7	167,5	2611	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,071	8,181	8,287	8,386	8,481	8,572	8,659	8,742

0,016	υ	0,0010018	0,0010079	9,573	10,160	10,740	11,320	11,899	12,478	13,057	13,635
	i	83,7	167,5	2610	2649	2687	2725	2763	2802	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	8,009	8,120	8,225	8,324	8,419	8,510	8,597	8,680
0,020	υ	0,0010018	0,0010079	0,000171	8,119	8,584	9,049	9,513	9,977	10,441	10,905
	i	83,7	167,5	251,1	2648	2687	2725	2763	2801	2840	2879
	s	0,2964	0,5715	0,8307	8,015	8,120	8,220	8,315	8,406	8,493	8,576
0,030	υ	0,0010018	0,0010079	0,0010171	5,400	5,713	6,025	6,335	6,645	6,955	7,264
	i	83,7	167,5	251,1	2646	2685	2724	2762	2801	2839	2878
	s	0,2964	0,5715	0,8307	7,825	7,931	8,031	8,126	8,217	8,304	8,388
0,10	υ	0,0010018	0,0010079	0,0010171	0,0010289	1,695	1,795	1,889	1,984	2,078	2,172
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	2670	2717	2757	2796	2835	2875
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	7,360	7,465	7,562	7,743	7,828	
0,12	υ	0,0010018	0,0010079	0,0010171	0,0010289	0,0010434	1,491	1,572	1,650	1,729	1,807
	i	83,9	167,5	251,1	334,9	419,0	2715	2755	2795	2834	2874
	s	0,2964	0,5715	0,8307	1,0748	1,3067	7,376	7,475	7,668	7,657	7,742
0,60	υ	0,0010015	0,0010076	0,0010168	0,0010287	0,0010432	0,0010601	0,0010797	0,3167	0,3348	0,3520
	i	84,3	167,9	251,5	336,2	419,1	503,1	589,1	2759	2805	2849
	s	0,2965	0,7516	0,8302	1,0744	1,3062	1,5265	1,738	6,767	6,869	6,963
0,80	υ	0,0010015	0,0010076	0,0010167	0,0010280	0,0010431	0,0010600	0,0010795	0,0011020	0,2473	0,2609
	i	84,5	168,1	251,7	335,3	419,2	503,8	589,1	675,3	2792	2839
	s	0,2962	0,5714	0,8300	1,0742	1,3060	1,5263	1,737	1,941	6,715	6,814
1,0	υ	0,0010014	0,0010075	0,0010166	0,0010285	0,0010430	0,0010596	0,0010794	0,0011018	0,1049	0,2060
	i	84,7	168,3	251,8	335,4	419,3	503,9	589,2	675,4	2778	2827
	s	0,2960	0,5712	0,8298	1,0740	1,3058	1,5261	1,737	1,941	6,588	6,692

1,2	v	0,0010013	0,0010074	0,0010165	0,0010284	0,0010429	0,0010597	0,0010793	0,0011016	0,1645	0,1693
	i	84,9	168,5	251,9	335,4	419,4	504,0	589,3	675,5	2970	2816
	s	0,2959	0,5711	0,8297	1,0738	1,3056	1,5259	1,737	1,940	6,534	6,588
	v	0,0010012	0,0010073	0,0010164	0,0010282	0,0010427	0,0010596	0,0010792	0,0011015	0,0011271	0,1429
1,4	i	85,1	168,7	252,1	335,7	419,6	504,2	589,5	675,7	763,2	2803
	s	0,2958	0,5710	0,8296	1,0736	1,3054	1,5257	1,736	1,940	2,137	6,497
1,6	v	0,0010011	0,0010072	0,0010163	0,0010282	0,0010426	0,0010595	0,0010790	0,0011013	0,0011270	0,0011556
	i	85,3	168,8	252,2	335,8	419,7	504,3	589,6	675,7	763,2	852,4
	s	0,2958	0,5710	0,8296	1,0735	1,3052	1,5256	1,736	1,940	2,137	2,329
	v	0,0010010	0,0010071	0,0010162	0,0010281	0,0010425	0,0010594	0,0010789	0,0011012	0,0011268	0,0011562
1,8	i	85,5	169,0	252,4	336,0	419,9	504,5	589,8	675,8	763,2	852,4
	s	0,2957	0,5709	0,8295	1,0733	1,3050	1,5254	1,736	1,939	2,136	2,328
2,0	v	0,0010009	0,0010070	0,0010161	0,0010280	0,0010424	0,0010593	0,0010787	0,0011011	0,0011267	0,0011561
	i	85,7	169,2	252,6	336,2	419,9	504,7	589,9	675,9	763,2	852,4
	s	0,2957	0,5708	0,8294	1,0731	1,3050	1,5252	1,736	1,939	2,136	2,328
	v	0,0010004	0,0010065	0,0010157	0,0010275	0,0010419	0,0010587	0,0010782	0,0011004	0,0011258	0,0011551
3,0	i	86,7	170,1	253,5	337,0	420,9	505,4	590,5	676,4	753,7	852,6
	s	0,2956	0,5707	0,8290	1,0726	1,3038	1,5244	1,738	1,939	2,134	2,326
8,0	v	0,0009983	0,0010043	0,0010134	0,0010254	0,0010398	0,0010584	0,0010754	0,0010972	0,0011220	0,0011304
	i	91,3	174,6	257,8	341,2	424,9	509,1	593,9	679,6	766,7	856,0
	s	0,2943	0,5686	0,8260	1,0689	1,2996	1,5198	1,730	1,931	2,126	2,317
	v	0,0009978	0,0010038	0,0010129	0,0010249	0,0010393	0,0010539	0,0010749	0,0010966	0,0011213	0,0011496
9,0	i	92,3	175,6	258,7	342,1	425,7	509,8	594,6	680,3	767,4	863,8
	s	0,2941	0,5681	0,8253	1,0682	1,2988	1,5189	1,729	1,930	2,125	2,318

10,0	v	0,0009975	0,0010031	0,0010125	0,0010245	0,0010388	0,0010532	0,0010741	0,0010956	0,0011201	0,0011482
	i	93,2	176,9	259,6	342,9	426,5	510,5	595,3	681,0	768,0	836,0
	s	0,2939	0,5674	0,8247	1,0676	1,2982	1,5182	1,728	1,929	2,123	2,314
	v	0,0009965	0,0010024	0,0010116	0,0010236	0,0010379	0,0010544	0,0010732	0,0010946	0,0011189	0,0011322
12,0	i	98,1	178,2	261,4	344,6	428,1	512,0	596,7	682,4	762,1	901,5
	s	0,2935	0,3668	0,8236	1,0662	1,2967	1,5163	1,727	1,927	2,121	2,404
	v	0,0009961	0,0010020	0,0010112	0,0010231	0,0010373	0,0010538	0,0010725	0,0010939	0,0011182	0,0011438
13,0	i	96,0	179,0	262,2	345,4	428,9	512,7	597,4	683,0	769,7	857,4
	s	0,2031	0,5664	0,8230	1,0655	1,2959	1,5156	1,726	1,926	2,119	2,309
	v	0,0009957	0,0010016	0,0010108	0,0010226	0,0010368	0,0010533	0,0010719	0,0010932	0,0011174	0,0011448
14,0	i	96,9	179,9	263,0	364,2	429,6	513,4	598,0	683,6	770,2	857,9
	s	0,2030	0,5660	0,8224	1,0648	1,2951	1,5148	1,724	1,925	2,118	2,308
	v	0,0009948	0,0010007	0,0010099	0,0010217	0,0010359	0,0010522	0,0010707	0,0010918	0,0011157	0,0011430
16,0	i	98,9	181,7	264,7	347,9	431,2	514,9	599,4	684,9	771,3	858,8
	s	0,2925	0,5653	0,8212	1,0634	1,2937	1,5131	1,722	1,922	2,116	2,305
	v	0,0009912	0,0009973	0,0010065	0,0010132	0,0010320	0,0010479	0,0010000	0,0010864	0,0011093	0,0011337
24,0	i	106,4	188,8	217,5	354,3	437,2	520,8	604,9	689,9	775,7	862,6
	s	0,2911	0,5625	0,8169	1,0582	1,2881	1,5062	1,715	1,915	2,108	2,295
	v	0,0009886	0,0009949	0,0010065	0,0010156	0,0010293	0,0010450	0,001626	0,0010825	0,0011050	0,0011305
30,0	i	112,0	194,1	276,5	359,1	441,9	525,1	609,0	693,6	779,1	865,4
	s	0,2902	0,5603	0,8140	1,0545	1,2834	1,5024	1,709	1,908	2,100	2,287

P , МПа	t , °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,004	v	56,93	59,24	61,56	63,87	66,18	71,96	77,73	85,31	89,28	100,84
	i	2918	2958	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,402	9,479	9,554	9,627	9,698	9,866	10,024	10,174	10,317	10,585
0,008	v	28,44	29,80	30,76	31,90	33,06	35,94	38,84	41,72	44,61	50,38
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,081	9,159	9,234	9,306	9,377	9,546	9,704	9,854	9,997	10,265
0,010	v	22,77	23,68	24,60	25,53	26,46	28,78	31,08	33,39	35,70	40,32
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,978	9,056	9,131	9,203	9,274	9,443	9,601	9,751	9,895	10,162
0,012	v	18,96	19,73	20,50	21,27	22,04	23,96	25,89	27,82	29,74	33,60
	i	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,894	8,972	9,047	9,119	9,190	9,359	9,517	9,687	9,810	10,078
0,014	v	16,24	16,90	17,56	18,22	18,88	20,53	22,18	23,83	25,49	28,79
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,823	8,900	8,975	9,048	9,119	9,288	9,446	9,596	9,739	10,007
0,016	v	14,213	14,790	15,357	15,943	16,52	17,96	19,41	20,85	22,29	25,18
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,761	8,838	8,913	8,986	9,057	9,226	9,384	9,534	9,678	9,945
0,020	v	11,369	11,832	12,295	12,758	13,220	14,376	15,530	16,68	17,82	20,13
	i	2918	2957	2996	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,657	8,735	8,810	8,883	8,954	9,123	9,281	9,431	9,575	9,842
0,030	v	7,573	7,882	8,191	8,500	8,809	9,580	10,351	11,121	11,891	13,430
	i	2917	2956	2996	3036	3076	3177	3280	3384	3490	3707

	S	8,469	8,547	8,622	8,695	8,766	8,935	9,093	9,244	9,388	9,655
0,10	v	2,266	2,359	2,452	2,545	2,638	2,871	3,102	3,334	3,565	4,028
	i	2914	2954	2993	3033	3074	3175	3278	3382	3488	3706
	s	7,910	7,988	8,064	8,139	8,211	8,381	8,541	8,690	8,833	9,097
0,12	v	1,886	1,964	2,042	2,120	2,197	2,391	2,584	2,777	2,970	3,357
	i	2913	2953	2993	3033	3073	3174	3278	3382	3488	3705
	s	7,824	7,903	7,989	8,053	8,126	8,296	8,456	8,606	8,749	9,013
0,60	v	0,3688	0,3853	0,4019	0,4181	0,4342	0,4741	0,5136	0,5528	0,5919	0,6697
	i	2891	2933	2975	3017	3059	3164	3270	3376	3483	3701
	s	7,051	7,135	7,215	7,292	7,368	7,541	7,704	7,857	8,001	8,258
0,80	v	0,2939	0,2867	0,2993	0,3118	0,3240	0,3542	0,3842	0,4137	0,4432	0,5018
	i	2883	2926	2969	3011	3054	3160	3267	3373	3481	3699
	s	6,905	6,991	7,073	7,151	7,226	7,404	7,568	7,722	7,866	8,132
1,0	v	0,2169	0,2274	0,2377	0,2478	0,2578	0,2822	0,3065	0,3303	0,3539	0,4010
	i	2874	2918	2962	3003	3048	3158	3263	3370	3479	3698
	s	6,788	6,877	6,961	7,040	7,176	7,296	7,461	7,615	7,761	8,027
1,2	v	0,1788	0,1879	0,1967	0,2054	0,2139	0,2343	0,2547	0,2747	0,2944	0,3339
	i	2865	2911	2955	2999	3042	3151	3260	3368	3477	3696
	s	6,688	6,780	6,866	6,949	7,025	7,026	7,373	7,529	7,647	7,942
1,4	v	0,1515	0,1596	0,1673	0,1748	0,1823	0,2001	0,2176	0,2349	0,2520	0,2858
	i	2855	2902	2948	2992	3036	3147	3256	3365	3474	3695
	s	6,602	6,697	6,784	6,867	6,945	7,130	7,299	7,455	7,601	7,870
1,6	v	0,1309	0,1382	0,1452	0,1519	0,1585	0,1743	0,1899	0,2051	0,2201	0,2499
	i	2844	2893	2940	2986	3030	3142	3253	3363	3472	3693
	s	6,524	6,622	6,711	6,796	6,877	7,063	7,233	7,390	7,537	7,806

1,8	v	0,1149	0,1216	0,1280	0,1341	0,1401	0,1545	0,1683	0,1819	0,1953	0,2219
	i	2833	2884	2932	2979	3025	3138	3249	3360	3470	3691
	s	6,452	6,554	6,646	6,732	6,814	7,003	7,175	7,333	7,480	7,750
2,0	v	0,1021	0,1084	0,1143	0,1200	0,1255	0,1384	0,1511	0,1634	0,1735	0,1993
	i	2821	2875	2924	2972	3019	3134	3246	3357	3468	3690
	s	6,385	6,491	6,585	6,674	6,757	7,049	7,122	7,282	7,429	7,701
3,0	v	0,0011891	0,06826	0,07294	0,07720	0,08119	0,09051	0,09929	0,1078	0,1161	0,1325
	i	943,5	2823	2882	2937	2988	3111	3229	3343	3456	3682
	s	2,514	6,225	6,337	6,438	6,530	6,735	6,916	7,080	7,231	7,305
8,0	v	0,0011833	0,0012221	0,0012689	0,0013275	0,02429	0,03003	0,03438	0,03821	0,04177	0,04844
	i	945,1	1037,9	1134,4	1235,4	2784	2985	3135	3270	3397	3640
	s	2,504	2,688	2,873	3,059	5,788	6,126	6,358	6,552	6,722	7,019
9,0	v	0,0011822	0,0012207	0,0012669	0,0013246	0,0014016	0,02586	0,03001	0,03354	0,03680	0,04285
	i	945,2	1038,1	1134,2	1234,9	1344,3	2954	3114	3254	3386	3631
	s	2,502	2,686	2,870	3,056	3,249	6,033	6,280	6,481	6,656	6,957
10,0	v	0,0011805	0,0012185	0,0012650	0,0013217	0,0013970	0,02247	0,02646	0,02979	0,03281	0,03837
	i	945,8	1038,3	1134,1	1234,5	1342,2	2920	3093	3239	3372	3621
	s	2,500	2,684	2,868	3,053	3,244	5,940	6,207	6,416	6,596	6,901
12,0	v	0,0011788	0,0012164	0,0012612	0,0013164	0,0013886	0,01726	0,02113	0,02414	0,02681	0,03163
	i	946,6	1038,7	1133,9	1233,7	1340,0	2844	3049	3206	3347	3603
	s	2,497	2,680	2,863	3,046	3,235	5,755	6,071	6,298	6,487	6,803
13,0	v	0,0011777	0,0012150	0,0012593	0,0013137	0,0013847	0,01514	0,01905	0,02197	0,02450	0,02903
	i	946,9	1038,9	1133,8	1233,3	1339,0	2799	3026	3189	3334	3594
	s	2,495	2,678	2,860	3,043	3,230	5,657	6,006	6,243	6,438	6,758

14,0	v	0,0011766	0,0012136	0,0012575	0,0013111	0,0013808	0,01325	0,01726	0,02010	0,02252	0,02683
	i	947,3	1039,1	1133,8	1232,9	1338,0	2750	3000	3172	3321	3585
	s	2,493	2,676	2,858	3,040	3,226	5,55	5,942	6,190	6,390	6,716
16,0	v	0,0011744	0,0012109	0,0012539	0,0013061	0,0013735	0,00978	0,01429	0,01704	0,01930	0,02322
	i	948,9	1039,5	1133,7	1232,2	1336,2	2612	2945	3137	3294	3567
	s	2,489	2,672	2,853	3,035	3,218	5,302	5,816	6,090	6,303	6,640
24,0	v	0,0011658	0,0012004	0,0012404	0,0012883	0,0013475	0,001612	0,00676	0,00977	0,01174	0,01478
	i	960,9	1041,3	1134,0	1230,3	1331,2	1625	2638	2971	3174	3493
	s	2,477	2,657	2,835	3,011	3,190	3,684	5,236	5,723	5,999	6,394
30,0	v	0,0011597	0,0011931	0,0012313	0,0012764	0,0013311	0,001556	0,00283	0,00672	0,00869	0,01144
	i	953,3	1042,9	1134,7	1229,0	1329,0	1608	2155	2816	3073	3434
	s	2,468	2,647	2,822	2,996	3,171	3,640	4,476	5,446	5,799	6,242

Навчальне видання

ВАСИЛЕНКО Інна Анатоліївна
КУМАНЬОВ Сергій Олександрович
ПІВОВАРОВ Олександр Андрійович

ЗБІРНИК ЗАДАЧ ТА ВПРАВ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Навчальний посібник

Підписано до друку 24.11.14 Формат 60х84/16.

Умов. друк. арк. 14,53.

Тираж – 300 прим. Замовлення №3990.

Видавництво та друкарня ТОВ «Акцент ПП»
вул. В. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052
тел. (056) 794-61-04(05)

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014*