

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"
Інститут хімічних технологій та фармації

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять та самостійної роботи з курсу
"Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів"
для здобувачів вищої освіти за спеціальністю
161 – Хімічні технології та інженерія

Затверджено на засіданні кафедри ХТ
Протокол № 1 від 04.01.2022 р.

Одеса: ОП, 2022

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів" для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Уклад.: Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, Л.В. Тимошевська, Національний ун-т "Одеська політехніка". – Одеса, 2022. – 20 с.

Укладачі: Іванченко Л.В., к.т.н, доцент,
Кожухар В.Я., д.т.н., професор,
Тимошевська Л.В., к.т.н.

Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, Л.В. Тимошевська. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів". В методичних вказівках наведено приклади термодинамічних розрахунків та розв'язування практичних завдань пов'язаних з удосконаленням та роботою теплотехнічного обладнання; наведено контрольні запитання та варіанти індивідуальних завдань для самостійної роботи. Методичні вказівки призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія

ЗМІСТ

| | |
|--|--|
| 1. ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА | 3 |
| 1.1 Термодинамічні характеристики речовин | 3 |
| 1.1.1 Приклади розв'язування задач..... | 3 |
| 1.1.2 Завдання для самостійної роботи | 4 |
| 1.1.3 Контрольні запитання..... | 4 |
| 1.2. Перший закон термодинаміки | 4 |
| 1.2.1 Приклади розв'язування задач..... | 4 |
| 1.2.2 Завдання для самостійної роботи | 6 |
| 1.2.3 Контрольні запитання..... | 6 |
| 1.3 Другий закон термодинаміки..... | 6 |
| 1.3.1 Приклади розв'язування задач..... | 6 |
| 1.3.2 Завдання для самостійної роботи | 9 |
| 1.3.3 Контрольні запитання..... | 9 |
| 2 ВЛАСТИВОСТІ В ПРОЦЕСИ ВОДЯНОЇ ПАРИ..... | 10 |
| 2.1 Приклади розв'язування задач..... | 10 |
| 2.2 Завдання для самостійної роботи | 11 |
| 2.3 Контрольні запитання..... | 12 |
| 3 ЕКСЕРГІЯ..... | 12 |
| 3.1 Приклади розв'язування задач..... | 12 |
| 3.2 Завдання для самостійної роботи | 13 |
| 3.3 Контрольні запитання..... | 14 |
| 4 ТЕПЛОСИЛОВІ УСТАНОВКИ У ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ | 14 |
| 4.1 Приклади розв'язування задач..... | 14 |
| 4.2 Завдання для самостійної роботи | 15 |
| 4.3 Контрольні запитання..... | 15 |
| 5 ХОЛОДОГЕНЕРУЮЧІ УСТАНОВКИ У ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ..... | 16 |
| 5.1 Приклади розв'язування задач..... | 16 |
| 5.2 Завдання для самостійної роботи | 17 |
| 5.3 Контрольні запитання..... | 17 |
| 6 ПАЛИВО. ОСНОВИ ГОРІННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА..... | 18 |
| 6.1 Приклади розв'язування задач..... | 18 |
| 6.2 Завдання для самостійної роботи | 19 |
| 6.3 Контрольні запитання..... | 19 |
| ЛІТЕРАТУРА | Ошибка! Закладка не определена. |

1. ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

1.1 Термодинамічні характеристики речовин

1.1.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 1.1.1.

До двох посудин підводиться одна і та сама кількість тепла по 41840 Дж до кожного. Кожна посудина має масу 1 кг, однак одна із них алюмінієва, а інша – залізна. Визначити, наскільки градусів нагріта кожна посудина.

Розв'язок. Згідно з рівнянням:

$$c = \frac{q_{1-2}}{T_2 - T_1} = \frac{q_{1-2}}{\Delta T}, \quad (1.1)$$

звідки

$$\Delta T_{Al} = \frac{q_{1-2}}{c_{pAl}}; \quad (1.2)$$

$$\Delta T_{Al} = \frac{41840}{899,6} = 46,5 \text{ К},$$

де теплоємність за умови сталого тиску для алюмінію дорівнює $c_{pAl} = 899,6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, для заліза – $c_{pFe} = 472 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

$$\Delta T_{Fe} = \frac{q_{1-2}}{c_{pFe}} = \frac{41840}{472} = 88,5 \text{ К}.$$

Приклад 1.1.2.

Тиск у випарному апараті за манометром дорівнює 1,5 МПа; розрідження в конденсаторі за вакуумметром становить 708,2 мм рт. ст. Визначити абсолютний тиск у випарному апараті і конденсаторі, якщо покази барометра $P_{бар} = 735 \text{ мм рт. ст.}$

Розв'язок. Абсолютний тиск у випарному апараті визначається за формулою:

$$P_{абс} = P_n + P_a; \quad (1.3)$$

$$P_{абс} = 1,5 + \frac{735}{750} = 1,5 + 0,98 = 2,48 \text{ МПа}.$$

Враховуючи, що $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 0,1013 \text{ МПа} = 1,0132 \text{ бар}$, абсолютний тиск в конденсаторі:

$$P_{абс} = P_a - P_{вак}; \quad (1.4)$$

$$P_{абс} = 735 - 708,2 = 26,8 \text{ мм рт. ст.} = 0,0036 \text{ МПа}.$$

Приклад 1.1.3.

Визначити, яка кількість балонів ємністю 100 л необхідна для перевезення 400 кг кисню, якщо температура $25 \text{ }^\circ\text{C}$, тиск газу в балоні 16 МПа. Барометричний тиск прийняти таким, що дорівнює 760 мм рт. ст.

Розв'язок. Визначаємо кількість кисню, який міститься в одному балоні, з рівняння Клайперона:

$$G' = \frac{P \cdot V}{R_{O_2} \cdot T}. \quad (1.5)$$

Абсолютний тиск визначиться за аналогією з прикладом 1.2:

$$P_{абс} = P_n + P_a = 16 \cdot 10^6 + \frac{760}{750} \cdot 10^5 = 161 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Об'єм балона визначиться переведенням літра в м³, тобто:

$$V = \frac{100}{1000} = 0,1 \text{ м}^3.$$

Газова стала для кисню:

$$R_{\text{O}_2} = \frac{R}{M_{\text{O}_2}} = \frac{8314}{32} = 260 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Тоді

$$G' = \frac{161 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{260 \cdot 298} = 21 \text{ кг}.$$

Необхідна кількість балонів дорівнюватиме:

$$n = \frac{G}{G'} = \frac{400}{21} = 19 \text{ балонів}.$$

1.1.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. До двох посудин підводиться одна і та сама кількість тепла по $(32560 + 100n)$ кДж до кожного. Кожна посудина має масу 1 кг, однак одна із них мідна, а інша – залізна. Визначити, наскільки градусів нагріта кожна посудина.

2. Тиск у випарному апараті за манометром дорівнює $(1,5 + 0,1n)$ МПа; розрідження в конденсаторі за вакуумметром становить $(706,2 + n)$ мм рт. ст. Визначити абсолютний тиск у випарному апараті і конденсаторі, якщо покази барометра $P_{\text{бар}} = (728 + n)$ мм рт. ст.

3. Визначити, яка кількість балонів ємністю 100 л необхідна для перевезення $(300 + n)$ кг кисню, якщо температура $(25 + n)$ °С, тиск газу в балоні 17 МПа. Барометричний тиск прийняти таким, що дорівнює 760 мм рт. ст.

1.1.3 Контрольні запитання

1. Що ми розуміємо під інтенсивними і екстенсивними властивостями речовин?
2. Що характеризують такі параметри стану, як тиск та температура?
3. Наведіть рівняння, що описують стан ідеальної та реальної речовини.
4. Дайте визначення термодинамічної системи.
5. Дайте визначення термодинамічного процесу і пояснить які процеси ми називаємо рівноважними і нерівноважними.
6. Які процеси ми називаємо оборотними і необоротними?
7. Дайте визначення теплоємності і покажіть, від чого залежить теплоємність.

1.2. Перший закон термодинаміки

1.2.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 1.2.1.

До шматку льоду масою 2 кг за умови 0 °С підведене тепло в кількості 669,4 кДж. В результаті топлення одержуємо 2 кг води за 0 °С. Як пояснити цей результат?

Розв'язок. Приймемо, що об'єм в процесі плавлення змінюється мало, тобто $dV = 0$. Згідно з першим законом термодинаміки маємо:

$$dQ = dU + PdV. \quad (1.6)$$

Оскільки $dV = 0$, то усе тепло пішло на зміну внутрішньої енергії системи, звідки випливає висновок: для розтоплення 2 кг льоду за умови 0 °С потрібно затратити 669,4 кДж.

Приклад 1.2.2.

В циліндрі під поршнем міститься 10 г кисню за умови атмосферного тиску 99341 Па. До газу підведено тепло в кількості 562 Дж, в процесі підведення тепла його температура зростає з 30 до 91,1 °С. Визначити, наскільки в цьому процесі зміниться об'єм.

Розв'язок. Відповідно до першого закону термодинаміки:

$$dQ = dU + PdV = G \cdot c_v dT + PdV, \quad (1.7)$$

Звідки

$$dV = \frac{1}{P} (dQ - \mu \cdot M \cdot c_v dT),$$

де μ - число молей газу.

Тоді

$$\Delta V = \frac{1}{99342} \cdot \left[562 - \frac{10}{32} \cdot 21,04 \cdot (91,1 - 30) \right] = 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Приклад 1.2.3.

На вході в циліндр низького тиску турбіни пара має температуру 260 °С. В процесі розширення температура падає до 35 °С. Визначити величину роботи, яку здійснює пара в турбіні, якщо нехтувати втратами тепла в оточуюче середовище; теплоємність прийняти такою, що дорівнює $c_v = 2008$ Дж/(кг · К). Покажіть процес в P – V координатах.

Розв'язок. Оскільки процес розширення в турбіні здійснюється за умови $S = \text{const}$, (адіабатний), то згідно з першим законом термодинаміки:

$$dq = du + pdv = c_v dT + pdv = 0;$$

$$dl = pdv = -c_v dT;$$

$$l = -2008 \cdot (35 - 260) = 452 \text{ кДж/кг}. \quad (1.8)$$

Приклад 1.2.4.

В циліндрі знаходиться повітря об'ємом $V_1 = 400$ л за умови тиску 0,5 МПа і температури 400 °С. Визначити, чому дорівнюватиме об'єм повітря V_2 , якщо за умови незмінного тиску температуру його понизити до 0 °С. Визначити також кількість відведеного тепла і здійснену зовнішнім середовищем роботу. Середню теплоємність повітря в заданому інтервалі температур прийняти такою, що дорівнює 1,03 кДж/(кг · К).

Розв'язок. Визначим масу повітря, користуючись рівнянням Клайперона:

$$G = \frac{P_1 \cdot V_1}{R \cdot T} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 400 \cdot 10^{-3}}{\frac{8314}{29} \cdot (400 + 273)} = 1,015 \text{ кг}. \quad (1.9)$$

Для визначення V_2 застосуємо рівняння для ізобарного процесу:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}; \quad V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 400 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0 + 273}{400 + 273} = 0,162 \text{ м}^3. \quad (1.10)$$

Роботу визначимо за формулою:

$$L = G \cdot l = P \cdot (V_2 - V_1) = 0,5 \cdot 10^6 \cdot (0,162 - 0,4) = -11890 \text{ Дж}. \quad (1.11)$$

Робота в цьому процесі здійснюється силами зовнішнього середовища і йде на зменшення об'єму за одночасного відведення тепла, тому має від'ємний знак.

Кількість відведеного тепла можна визначити за формулою:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,015 \cdot 1,03 \cdot (273 - 673) = -419,52 \text{ кДж}. \quad (1.12)$$

Приклад 1.2.5.

Питома енергія скельної породи, яка використовується як акумулятор сонячної енергії, становить 580 кДж/(кг · К). Яка маса породи необхідна для нагромадження енергії, яку порода акумулює кожної години 200 МДж протягом 24 год за умови, що температура породи змінюється від 21 до 66 °С.

Розв'язок. Для визначення маси породи використаємо рівняння:

$$G = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{24 \cdot 200 \cdot 10^6}{580 \cdot 10^3 \cdot (66 - 21)} = 184 \text{ кг.} \quad (1.13)$$

1.2.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. В циліндрі під поршнем міститься $(10 + n)$ г азоту за умови атмосферного тиску $(95300 + 10 \cdot n)$ Па. До газу підведено тепло в кількості $(800 + n)$ Дж, в процесі підведення тепла його температура зростає з 25 до $(80 + n)$ °С. Визначити, наскільки в цьому процесі зміниться об'єм.

2. На вході в циліндр низького тиску турбіни пара має температуру $(240 + n)$ °С. В процесі розширення температура падає до 32 °С. Визначити величину роботи, яку здійснює пара в турбіні, якщо нехтувати втратами тепла в оточуюче середовище; теплоємність прийняти такою, що дорівнює $c_v = 2008$ Дж/(кг · К). Покажіть процес в $P - V$ координатах.

3. В циліндрі знаходиться повітря об'ємом $V_1 = (320 + n)$ л за умови тиску $(0,5 + 0,01 \cdot n)$ МПа і температури $(380 + n)$ °С. Визначити, чому дорівнюватиме об'єм повітря V_2 , якщо за умови незмінного тиску температуру його понизити до 5 °С. Визначити також кількість відведеного тепла і здійснену зовнішнім середовищем роботу. Середню теплоємність повітря в заданому інтервалі температур прийняти такою, що дорівнює 1,03 кДж/(кг · К).

1.2.3 Контрольні запитання

1. Чи є теплота і робота функцією процесу? Доведіть це.
2. Напишіть перший закон термодинаміки і пояснить його.
3. Доведіть, що робота розширення $L^{\text{розш}} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$.
4. Чи залежить зміна внутрішньої енергії від процесу і від яких параметрів залежить внутрішня енергія ідеальних газів?
5. Від яких параметрів залежить внутрішня енергія реальних газів?
6. Які з трьох термодинамічних параметрів однозначно визначають внутрішню енергію?
7. Дайте визначення ентропії. Як можна визначити кількість теплоти за допомогою ентропії?
8. Пояснить, в яких випадках ентропія буде збільшуватись, а в яких зменшуватись.
9. Нарисуйте довільний процес в діаграмі $T - S$ і покажіть, що означає площа під кривою процесу.

1.3 Другий закон термодинаміки

1.3.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 1.3.1.

Коефіцієнт корисної дії теплової машини, яка працює на пропані, температура горіння якого 2000 °С, становить 25 %. Порівняйте це значення ККД з коефіцієнтом корисної дії циклу

Карно для того самого інтервалу температур. Температура холодного джерела теплоти (охолоджувальної води) прийняти 20 °С.

Розв'язок. Визначимо термічний ККД оборотного циклу Карно за формулою:

$$\eta_T^{\text{о.ц.к.}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}; \quad (1.14)$$

$$\eta_T^{\text{о.ц.к.}} = 1 - \frac{293,15}{2273,15} = 0,871.$$

Отже, термічний ККД теплової машини значно нижчий порівняно з машиною, яка працює з циклом Карно.

Приклад 1.3.2.

Визначити термічний ККД, тиск, температуру і об'єм в характерних точках, корисне використане тепло і роботу циклу Карно, яку здійснює 1 кг повітря в інтервалі температур від $t_1 = 727$ °С до $t_2 = 127$ °С, якщо початковий тиск повітря дорівнює 6,0 МПа і якщо в процесі ізотермного стиснення за температури $t_2 = 127$ °С об'єм повітря скорочується у 2 рази.

Розв'язок. За формулою 1.14 визначаємо термічний ККД:

$$\eta_T^{\text{о.ц.к.}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{127 + 273,15}{727 + 273,15} = 1 - 0,4 = 0,6.$$

Покажемо на P – V діаграмі прямий цикл Карно 1-2-3-4 (рис. 1.1).

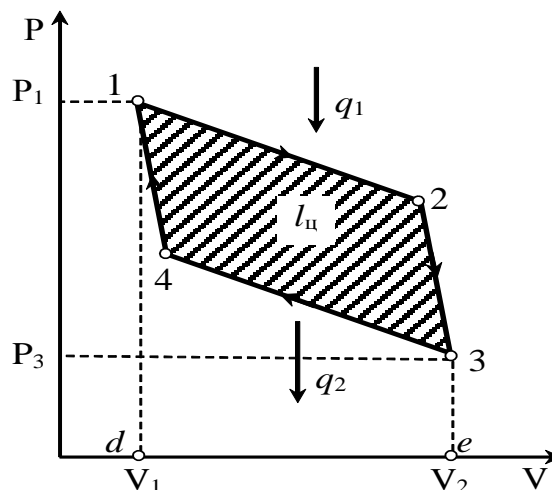


Рис. 1.1 – Прямий цикл Карно

Параметри точки 1: $P_1 = 6$ МПа; $T_1 = 1000$ К.

Об'єм повітря визначаємо з рівняння Клайперона:

$$V_1 = \frac{m \cdot R \cdot T_1}{P_1} = \frac{1 \cdot 287 \cdot (727 + 273)}{6 \cdot 10^6} = 0,0478 \text{ м}^3. \quad (1.15)$$

$$R = \frac{\mu \cdot R}{\mu_{\text{пов}}} = \frac{8314}{29} = 287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°С}). \quad (1.16)$$

Параметри точки 4. Точка 4 розміщена на адіабаті 4-1 і ізотермі 3-4 одночасно. Температура в точці 3 дорівнює $T_3 = 127 + 273 = 400$ К. Для адіабатного процесу справедливо відношення:

$$\frac{P_1}{P_4} = \left(\frac{T_1}{T_4} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad (1.17)$$

де K – показник адіабати; $K = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$.

$$P_4 = \frac{P_1}{\left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{K}{K-1}}} = \frac{6 \cdot 10^6}{\left(\frac{1000}{400}\right)^{1,4}} = 0,243 \text{ МПа.}$$

Об'єм в точці 4 визначаємо аналогічно, як і в точці 1.

$$V_4 = \frac{m \cdot R \cdot T_4}{P_4} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 400}{0,243 \cdot 10^6} = 0,483 \text{ м}^3.$$

Параметри точки 3. Згідно з умовою в точці 4 об'єм повітря скорочується в 2 рази, тому $V_3 = 2V_4 = 2 \cdot 0,483 = 0,966 \text{ м}^3$. Температура в точці 3 дорівнює температурі в точці 4, тобто $T_4 = T_3 = 400 \text{ К}$.

Тиск в точці 3 знайдемо з рівняння Клайперона:

$$P_3 = \frac{m \cdot R \cdot T_3}{V_3} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 400}{0,966} = 0,121 \text{ МПа.}$$

Параметри точки 2. Для адіабати 2-3, на якій лежить точка 3, справедливе рівняння, аналогічне, як і для точки 4, тобто:

$$P_2 = P_3 \cdot \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{K}{K-1}} = 0,121 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{1000}{400}\right)^{3,5} = 2,98 \text{ МПа.}$$

$$V_2 = \frac{m \cdot R \cdot T_2}{P_2} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 1000}{2,98 \cdot 10^6} = 0,098 \text{ м}^3.$$

Для визначення кількості тепла, яке підводиться до повітря в процесі 1-2, використаємо рівняння першого закону термодинаміки для ізотермного процесу:

$$q_1 = l_1 = R \cdot T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 287 \cdot \ln \frac{0,098}{0,0478} = 212 \text{ кДж/кг.} \quad (1.18)$$

Величину q_2 можна знайти з рівняння:

$$\eta_T = \frac{q_1 - q_2}{q_1}; \quad (1.19)$$

$$0,6 = \frac{212 - q_2}{212};$$

$$q_2 = 212 \cdot (1 - 0,6) = 84,8 \text{ кДж/кг.} \quad (1.19)$$

Для визначення роботи використаємо залежність:

$$l_{ц} = q_1 - q_2 = 212 - 84,8 = 127,2 \text{ кДж/кг.} \quad (1.20)$$

Приклад 1.3.3.

Визначити зміну ентропії системи, яка включає охолоджувальну воду в кількості 10 кг, що охолоджується від температури $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ до температури $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, холодне джерело теплоти має температуру $t_{х.д.т.} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, а його сумарна теплова ємність настільки велика порівняно з кількістю теплоти, яку воно отримує від охолоджувальної води, що його температуру ($t_{х.д.т.} = \text{const}$) можна вважати незмінною в процесі теплообміну.

Розв'язок. Сумарна ентропія системи, яка включає в себе воду і холодне джерело теплоти дорівнюватиме:

$$\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_{\text{води}} + \Delta S_{\text{х.д.т.}}. \quad (1.21)$$

Визначимо зміну ентропії 10 кг води в процесі її охолодження від $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ за формулою:

$$\Delta S_{\text{води}} = S_1 - S_2 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{G \cdot c_p}{T} dT = G \cdot c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 10 \cdot 4,19 \cdot \ln \frac{273+20}{273+60} = -5,4 \text{ кДж/К.} \quad (1.22)$$

Приймаємо, що $c_p = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{С)} = \text{const}$, тобто не змінюється у разі зміни температури.

Отже, ентропія води в процесі охолодження зменшується на $\Delta S_{\text{води}} = -5,4 \text{ кДж/К}$.

Разом з тим, ентропія холодного джерела теплоти зростатиме (тепло до холодного джерела теплоти підводиться):

$$\Delta S_{\text{х.д.т.}} = \frac{\Delta Q}{T_{\text{х.д.т.}}} \quad (1.23)$$

Кількість теплоти, відданої холодному джерелу теплоти, підрахуємо за формулою:

$$\Delta Q = G \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = 10 \cdot 4,19 \cdot (60 - 20) = 1676 \text{ кДж,} \quad (1.24)$$

тоді

$$\Delta S_{\text{х.д.т.}} = \frac{1676}{5 + 273} = 6,03 \text{ кДж/К.}$$

Нагадаємо, що $T_{\text{х.д.т.}} = \text{const}$ згідно з умовою задачі. Таким чином, сумарна ентропія системи зміниться на

$$\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_{\text{води}} + \Delta S_{\text{х.д.т.}} = -5,4 + 6,03 = 0,63 \text{ кДж/К.}$$

Тобто ентропія системи збільшиться.

Якщо б температура холодного джерела теплоти була б не $t_{\text{х.д.т.}} = 5 \text{ }^\circ\text{С}$, а, наприклад, $20 \text{ }^\circ\text{С}$, тобто різниця між температурою тіла, від якого відбирається тепло, і температурою тіла, яке одержує тепло, була меншою, то це означало б, що ступінь необоротності процесу зменшився. Це призвело б до того, що ентропія системи збільшилася б на меншу величину.

1.3.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. Коефіцієнт корисної дії теплової машини, яка працює на вуглеводні, температура горіння якого $(2000 + n) \text{ }^\circ\text{С}$, становить $(25 + n) \%$. Порівняйте це значення ККД з коефіцієнтом корисної дії циклу Карно для того самого інтервалу температур. Температура холодного джерела теплоти (охолоджувальної води) прийняти $20 \text{ }^\circ\text{С}$.

2. Визначити термічний ККД, тиск, температуру і об'єм в характерних точках, корисне використане тепло і роботу циклу Карно, яку здійснює 1 кг повітря в інтервалі температур від $t_1 = (650 + n) \text{ }^\circ\text{С}$ до $t_2 = (135 - n) \text{ }^\circ\text{С}$, якщо початковий тиск повітря дорівнює $(6,0 + 0,1n) \text{ МПа}$ і якщо в процесі ізотермного стиснення за температури $t_2 = (135 - n) \text{ }^\circ\text{С}$ об'єм повітря скорочується у 2 рази.

3. Визначити зміну ентропії системи, яка включає охолоджувальну воду в кількості 10 кг, що охолоджується від температури $t_1 = (95 - n) \text{ }^\circ\text{С}$ до температури $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{С}$, холодне джерело теплоти має температуру $t_{\text{х.д.т.}} = 5 \text{ }^\circ\text{С}$, а його сумарна теплова ємність настільки велика порівняно з кількістю теплоти, яку воно отримує від охолоджувальної води, що його температуру ($t_{\text{х.д.т.}} = \text{const}$) можна вважати незмінною в процесі теплообміну.

1.3.3 Контрольні запитання

1. Що ми називаємо термічним ККД?
2. Який цикл ми називаємо циклом Карно і які його характерні особливості?
3. Докажіть, що робота циклу дорівнює різниці кількості підведеного і відведеного тепла.

4. Який цикл ми називаємо оборотним, а який необоротним?
5. Сформулюйте другий закон термодинаміки та дайте його математичний вираз.
6. Що ми називаємо прямим і зворотним циклом?
7. Чи можливий перенос теплоти з нижчого температурного рівня на вищій і що для цього необхідно?
8. Наведіть рівняння об'єднаного першого та другого законів термодинаміки.
9. Наведіть вираз інтеграла Клаузіуса.
10. Чи може для ізольованої системи ентропія зменшуватися?

2 ВЛАСТИВОСТІ В ПРОЦЕСИ ВОДЯНОЇ ПАРИ

2.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 2.1. Перегріта пара за $P_1 = 3,0$ МПа і $t_1 = 350$ °С адіабатно розширюється до тиску $P_2 = 0,1$ МПа. Визначити початкові параметри пари (v_1, i_1) та параметри в кінці процесу розширення (v_2, i_2, t_2), користуючись i - s діаграмою.

Розв'язок. На діаграмі i - s знаходимо точку перетину ізобари P_1 і $t_1 = 350$ °С, яка характеризує початковий стан пари: $P_1 = 3,0$ МПа, $v_1 = 0,09$ м³/кг, $i_1 = 3110$ кДж/кг. Адіабатний процес на i - s діаграмі відобразиться прямою лінією $S_1 = S_2 = \text{const}$ до перетину з ізобарою $P_2 = 0,1$ МПа в точці 2. Кінцевий стан пари характеризує точка 2, в якій $x_2 = 0,93$, а $v_2 = 0,83$ м³/кг, $i_2 = 2552$ кДж/кг.

Температура в точці 2 визначиться ізотермою, що проходить через цю точку, а оскільки в області насиченої пари ізобара збігається з ізотермою, то за $x = 1$ $t_2 = 120$ °С, а тому точці 2 відповідатиме ця сама температура $t_2 = 120$ °С. Питомі об'єми v_1 і v_2 визначаються значеннями ізохор, які проходять через точки 1 і 2, тобто $v_1 = 0,09$ м³/кг, $v_2 = 0,83$ м³/кг. В процесі адіабатного розширення тиск збільшиться більше ніж у 9 разів.

Зміна внутрішньої енергії:

$$\Delta u = (i_2 - P_2 \cdot v_2) - (i_1 - P_1 \cdot v_1); \quad (2.1)$$

$$\Delta u = (2552 - \frac{0,2 \cdot 10^6}{10^3} \cdot 0,83) - (3110 - \frac{3 \cdot 10^6}{10^3} \cdot 0,09) = 454 \text{ кДж/кг.}$$

Оскільки в адіабатному процесі відсутній теплообмін з оточуючим середовищем і згідно з першим законом термодинаміки

$$q = \Delta u + l; \quad l = \Delta u,$$

то робота в процесі стиснення буде дорівнювати зміні внутрішньої енергії:

$$l = \Delta u = 454 \text{ кДж/кг.}$$

Приклад 2.2. Необхідно визначити, як зміняться параметри стану водяної пари, початковий стан якої характеризується тиском $P_1 = 0,45$ МПа, питомим об'ємом $v_1 = 0,4$ м³/кг в процесі:

- а) ізобарного нагрівання до 250 °С;
- б) ізобарного розширення до стану сухої насиченої пари ($x = 1$);
- в) адіабатного стиснення до $P_2 = 4$ МПа;
- г) адіабатного розширення до $P_2 = 0,006$ МПа.

Визначити параметри початкового стану пари, користуючись таблицями пари.

Розв'язок. За таблицею для сухої насиченої пари за $P_1 = 0,45$ МПа інтерполяцією знаходимо:

$$i' = 620,12 \text{ кДж/кг; } i'' = 2744,5 \text{ кДж/кг; } r = 2124,33 \text{ кДж/кг;}$$

$$S'_1 = 1,714 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К); } v'_1 = 0,00109 \text{ м}^3\text{/кг; } v''_1 = 0,421 \text{ м}^3\text{/кг; } t_{\text{н}} = 147 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Оскільки $v_1'' > v_1'$, то пара в початковому стані є вологою, ступінь сухості x знаходимо за формулою:

$$x = \frac{v_x}{v''} = \frac{0,4}{0,421} = 0,95. \quad (2.2)$$

Розв'яжемо цю задачу за допомогою $I - S$ діаграми. За цією діаграмою заданому початковому стану водяної пари відповідає ентальпія $i_1 = 2639,7$ кДж/кг; i ентропія $S_1 = 6,62$ кДж/(кг · К). Користуючись діаграмою і переміщаючись по ізобарі $P_1 = 0,45$ МПа, з початкової точки, яка характеризує початковий стан пари до перетини з ізотермою $t_0 = 250$ °С, одержимо такі параметри, якими характеризується пара в кінцевому стані: $i_2 = 2966,5$ кДж/кг; $S_2 = 7,33$ кДж/(кг · К). Переміщуючись від точки, яка характеризує початковий стан пари по ізобарі $P_1 = 0,45$ МПа до перетину з верхньою пограничною кривою, одержимо точку, яка характеризує суху насичену пару за тиском $P_1 = 0,45$ МПа. Цьому стану відповідають такі параметри: $t_n = 248$ °С; $i'' = 2744,5$ кДж/кг; $S'' = 7,29$ кДж/(кг · К); $x = 1$.

Переміщаючись від точки, що характеризує початковий стан пари, по адіабаті до перетину з ізобарою $P_2 = 0,006$ МПа, одержимо точку, якій відповідають такі параметри стану: $i_2 = 2036,34$ кДж/кг; $x_2 = 0,78$; $S_2 = S_1 = 6,62$ кДж/(кг · К).

Ентальпію пари визначимо за формулою:

$$i_x = i' + r \cdot x = 620,12 + 2124,33 \cdot 0,95 = 2639,7 \text{ кДж/кг}. \quad (2.3)$$

Ентропію пари визначимо за формулою:

$$S_x = S' + \frac{r \cdot x}{T_n} = 1,714 + \frac{2124,33 \cdot 0,95}{273 + 147} = 6,52 \text{ кДж/кг}. \quad (2.4)$$

Отже, розходження, одержані на діаграмі $I - S$, у таблицях і формулах, не виходять за межі звичайних розрахунків. Разом з тим, діаграма $I - S$ знано полегшує розв'язок поставлених задач.

Приклад 2.3. Визначити стан і параметри водяної пари за тиску $P = 2,5$ МПа, і температури $t = 500$ °С, користуючись таблицями насиченої пари.

Розв'язок. За заданим тиском з таблиці знаходимо температуру насичення $t_n = 226,04$ °С, тобто температура $t = 500$ °С вказує на те, що пара знаходиться в перегрітому стані. За таблицями перегрітої пари знаходимо:

$$v = 0,1399 \text{ м}^3/\text{кг}; i = 3461,9 \text{ кДж/кг}; S = 8,324 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Внутрішня енергія:

$$u = i - P \cdot v = 3461,9 - \frac{2,5 \cdot 10^6}{10^3} = 961,9 \text{ кДж/кг}. \quad (2.5)$$

2.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. Перегріта пара за $P_1 = (3,0 + n)$ МПа і $t_1 = (350 + 10 \cdot n)$ °С адіабатно розширюється до тиску $P_2 = 0,1$ МПа. Визначити початкові параметри пари (v_1, i_1) та параметри в кінці процесу розширення (v_2, i_2, t_2), користуючись i - s діаграмою.

2. Необхідно визначити, як зміняться параметри стану водяної пари, початковий стан якої характеризується тиском $P_1 = (0,45 + 0,01 \cdot n)$ МПа, питомим об'ємом $v_1 = (0,4 + 0,01 \cdot n)$ м³/кг в процесі:

а) ізобарного нагрівання до $(250 + 10 \cdot n)$ °С;

б) ізобарного розширення до стану сухої насиченої пари ($x = 1$);

в) адіабатного стиснення до $P_2 = (4 + 0,1 \cdot n)$ МПа;

г) адіабатного розширення до $P_2 = (0,006 + 0,0005 \cdot n)$ МПа.

Визначити параметри початкового стану пари, користуючись таблицями пари.

3. Визначити стан і параметри водяної пари за тиску $P = (2,5 + 0,1 \cdot n)$ МПа, і температури $t = (400 + 10 \cdot n)$ °С, користуючись таблицями насиченої пари.

2.3 Контрольні запитання

1. Що ми називаємо фазовим переходом?

2. Що ми називаємо потрійною точкою і критичною точкою?

3. Яку пару ми називаємо вологою, сухою і перегрітою?

4. Покажіть на діаграмах $P - V$ і $T - S$ процес пароутворення.

5. Що ми називаємо сухістю пари і як вона визначається.

6. Наведіть формули для визначення ентальпії і ентропії вологої пари.

7. Що ми називаємо теплотою пароутворення і на що вона витрачається? Наведіть формулу для її визначення.

8. Як будуть змінюватися параметри сухої насиченої пари у разі підведення до неї теплоти за $P = \text{const}$.

9. Покажіть на діаграмах $P - V$, $T - S$ та $I - S$ ізохорний процес зміни стану водяної пари в процесі підведення або відведення тепла.

10. Покажіть на діаграмах $P - V$, $T - S$ та $I - S$ ізобарний процес зміни стану водяної пари в процесі підведення або відведення тепла.

11. Покажіть на діаграмах $P - V$, $T - S$ та $I - S$ ізотермний процес зміни стану водяної пари в процесі підведення або відведення тепла.

12. Покажіть на діаграмах $P - V$, $T - S$ та $I - S$ адіабатний процес зміни стану водяної пари в процесі підведення або відведення тепла.

3 ЕКСЕРГІЯ

3.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 3.1. В котлі під час спалювання палива виділяється тепловий потік $q = 32000$ кДж/кг за температури $t_1 = 1900$ °С ($T_1 = 2173$ К) з метою одержання перегрітої пари з температурою $t'_1 = 500$ °С ($T'_1 = 773$ К). Температура оточуючого середовища $t_0 = 20$ °С ($T_0 = 293$ К). Визначити зміну ентропії, втрату ексергії і ексергетичний ККД в процесі обміну тепла між продуктом згорання та паром.

Розв'язок. Для 1 кг палива зміна ентропії системи, яка складається з продуктів згорання і пари, становить:

$$\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_{\text{пр.згор}} + \Delta S_{\text{пари}} = -\frac{q}{T'_1} + \frac{q}{T_1} = q \cdot \frac{T_1 - T'_1}{T'_1 \cdot T_1}; \quad (3.1)$$

$$\Delta S_{\text{сист}} = 32000 \cdot \frac{2173 - 773}{2173 \cdot 773} = 27 \text{ кДж.}$$

Ексергія теплоти продуктів згорання:

$$e_{q_{\text{пр.згор}}} = q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) = 32000 \cdot \left(1 - \frac{293}{2173}\right) = 27700 \text{ кДж/кг.} \quad (3.2)$$

Ексергія теплоти пари:

$$e_{q_{\text{пари}}} = q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T'_1}\right) = 32000 \cdot \left(1 - \frac{293}{773}\right) = 19800 \text{ кДж/кг.} \quad (3.3)$$

Втрата ексергії становить:

$$d = e_{q_{\text{пр.згор}}} - e_{q_{\text{парн}}} = 27700 - 19800 = 7900 \text{ кДж/кг.} \quad (3.4)$$

Зауважимо, що такий результат ми одержимо згідно з рівнянням Гюї-Стодоли:

$$d = T_0 \cdot \Delta S = 293 \cdot 27 = 7900 \text{ кДж/кг.} \quad (3.5)$$

Ексергетичний ККД процесу теплообміну в котлі визначиться за рівнянням:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{e_{\text{вих}}}{e_{\text{вх}}} = \frac{e_{q_{\text{парн}}}}{e_{q_{\text{пр.згор}}}} = \frac{19800}{27700} = 0,72, \text{ або } 72 \%. \quad (3.6)$$

Приклад 3.2. В турбогенератор подається перегріта пара за $T_1 = 753 \text{ К}$ і тиску $P_1 = 1 \text{ МПа}$, за допомогою якого виробляється електроенергія в кількості $I_{\text{ел}} = 1207 \text{ кДж/кг}$. Пара з турбіни виходить з такими параметрами: $T_2 = 386 \text{ К}$ і тиску $P_2 = 0,16 \text{ МПа}$. Визначити втрати ексергії внаслідок необоротності процесу розширення пари в турбіні і ексергетичний ККД. Температура оточуючого середовища $T_0 = 283 \text{ К}$.

Розв'язок. На відміну від попереднього прикладу у цьому разі здійснюється корисна робота $I_{\text{ел}} = I_{\text{кор}}$, тому для визначення втрат ексергії використовуємо рівняння:

$$d = (I_{\text{вх}}^T - I_{\text{вих}}^T) - I_{\text{вх}}; \quad (3.7)$$

$$d^T = (e_{\text{вих}}^{\text{п}} - e_{\text{вих}}^T) - I_{\text{кор}}. \quad (3.8)$$

Ця величина враховує втрати ексергії, які обумовлені як необоротним характером потоку пари в проточній частині турбіни, так і втратами на тертя в механізмі турбіни, а також механічними і електричними втратами в генераторі.

Визначимо $e_{\text{вих}}^{\text{п}}$:

$$e_{\text{вих}}^{\text{п}} = (i_1 - i_0) - T_0(S_1 - S_0). \quad (3.9)$$

Для пари з початковими параметрами T_1 і P_1 за таблицями перегрітої пари знаходимо $i_1 = 3435,1 \text{ кДж/кг}$; $S_1 = 7,7061 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $i_0 = 42,1 \text{ кДж/кг}$; $S_0 = 0,151 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

$$e_{\text{вих}}^{\text{п}} = (3435,1 - 42,1) - 283,15 \cdot (7,7061 - 0,151) = 1609 \text{ кДж.}$$

$$e_{\text{вих}}^T = (i_2 - i_0) - T_0(S_2 - S_0), \quad (3.10)$$

де $i_2 = 2796 \text{ кДж/кг}$; $S_2 = 7,2063 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ – ентальпія і ентропія пари за T_2 і P_2 вибрані з таблиць термодинамічних властивостей водяної пари.

$$e_{\text{вих}}^T = (2796 - 42,1) - 283,15 \cdot (7,2063 - 0,151) = 129 \text{ кДж.}$$

$$d^T = (1609 - 129) - 1207 = 273 \text{ кДж.}$$

Ексергетичний ККД турбогенераторної установки дорівнюватиме:

$$\eta_{\text{ex}}^T = \frac{I_{\text{кор}}}{e_{\text{вих}}^{\text{п}} - e_{\text{вих}}^T} = \frac{1207}{1609 - 129} = 0,806 \text{ або } 80,6 \%. \quad (3.11)$$

3.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. В котлі під час спалювання палива виділяється тепловий потік $q = (32000 + 1000 \cdot n) \text{ кДж/кг}$ за температури $t_1 = (1900 + 10 \cdot n) \text{ }^\circ\text{C}$ з метою одержання перегрітої пари з температурою $t_1' = (500 + 10 \cdot n) \text{ }^\circ\text{C}$. Температура оточуючого середовища $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 = 293 \text{ К}$). Визначити зміну ентропії, втрату ексергії і ексергетичний ККД в процесі обміну тепла між продуктом згоряння та паром.

2. В турбогенератор подається перегріта пара за $T_1 = (753 + 10 \cdot n) \text{ К}$ і тиску $P_1 = 1 \text{ МПа}$, за допомогою якого виробляється електроенергія в кількості $I_{\text{ел}} = 1207 \text{ кДж/кг}$. Пара з турбіни

виходить з такими параметрами: $T_2 = (386 + n)$ К і тиску $P_2 = (0,11 + 0,01 \cdot n)$ МПа. Визначити втрати ексергії внаслідок необоротності процесу розширення пари в турбіні і ексергетичний ККД. Температура оточуючого середовища $T_0 = 283$ К.

3.3 Контрольні запитання

1. Дайте визначення ексергії і покажіть від чого вона залежить.
2. Яка відмінність термічного ККД від внутрішнього коефіцієнта корисної дії? Який з них більший?
3. Що ми розуміємо під внутрішнім відносним ККД і що він показує?
4. Що враховує ефективний ККД установки і як він визначається?
5. Які ви знаєте методи аналізу ефективності теплових установок?
6. Що ми називаємо середньою температурою підведення і відведення теплоти в циклі.
7. В чому полягає ексергетичний метод аналізу ефективності теплових машин?
8. Що таке ексергетичні втрати і як вони визначаються?
9. Наведіть формулу для визначення втрат ексергії.
10. Як визначається ексергія потоку і ексергія теплоти?
11. Як визначається втрата ексергії потоків робочого тіла для двох випадків, коли корисна робота здійснюється і коли вона відсутня?

4 ТЕПЛОСИЛОВІ УСТАНОВКИ У ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

4.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 4.1. Визначити термічний ККД паросилової установки, яка працює за циклом Ренкіна, якщо відомо, що тиск пари на вході в турбіну $P_1 = 9$ МПа і температура $t_1 = 500$ °С, а тиск в конденсаторі підтримується на рівні $P_2 = 0,004$ МПа.

Розв'язок. За $I - S$ діаграмою або за таблицями перегрітої пари для початкових P_1 і t_1 знаходимо точку перетину P_1 і t_1 , яким буде відповідати тепловміст $i_1 = 3386$ кДж/кг; в процесі адиабатного розширення в турбіні до тиску $P_2 = 0,004$ МПа ентальпія пари $i_2 = 2006$ кДж/кг; ентальпію конденсату, який поступає в котел, знаходимо за таблицями насиченої пари на кривій насичення за $P_2 = 0,004$ МПа $i'_2 = 121,42$ кДж/кг. Тоді термічний ККД дорівнюватиме:

$$\eta_{\text{Ренк}}^T = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2} = \frac{3386 - 2006}{3386 - 121,42} = 0,422 \text{ або } 42,2 \%. \quad (4.1)$$

Приклад 4.2. Визначити витрати водяної пари парової турбіни потужністю 25 тис. кВт · год, початкові параметри якої $P_1 = 9$ МПа і $t_1 = 500$ °С, а тиск в конденсаторі $P_2 = 0,004$ МПа.

Розв'язок. Для визначення витрат водяної пари використаємо рівняння теплового балансу:

$$D \cdot (i_1 - i_2) = N, \quad (4.2)$$

де N – потужність парової турбіни, кВт · год.

Беручи до уваги, що $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ кДж}$, отримаємо:

$$D = \frac{N}{(i_1 - i_2)} = \frac{3600 \cdot 25000}{3386 - 2006} = 65,24 \text{ т/год.}$$

Приклад 4.3. Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна з початковими параметрами $P_1 = 10$ МПа і $t_1 = 530$ °С. Тиск в конденсаторі $P_2 = 0,004$ МПа. Визначити термічний ККД циклу Ренкіна і Карно в заданому інтервалі температур.

Розв'язок. За таблицями теплофізичних властивостей води і водяної пари для $P_1 = 10$ МПа і $t_1 = 530$ °С визначаємо $i_1 = 3449$ кДж/кг; $i_3 = 121$ кДж/кг; $S_1 = 6,6949$ кДж/(кг · К); для $P_2 = 0,004$ МПа $S' = 0,4225$ кДж/(кг · К); $S'' = 8,4730$ кДж/(кг · К); $r = 2433$ кДж/кг; $t_2 = 30$ °С.

Визначаємо ступінь сухості x_2 :

$$x_2 = \frac{S_2 - S'}{S'' - S'} = \frac{6,6949 - 0,4225}{8,4730 - 0,4225} = 0,78. \quad (4.3)$$

Визначаємо ентальпію у точці 2:

$$i_2 = i_3 \cdot (1 - x_2) + i'' \cdot x_2 = 121 \cdot (1 - 0,78) + 2560 \cdot 0,78 = 2007 \text{ кДж/кг}. \quad (4.4)$$

Тоді термічний ККД циклу Ренкіна дорівнюватиме:

$$\eta_T^{\text{Ренк}} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} = \frac{3449 - 2007}{3449 - 121} = 0,429 \text{ або } 42,9 \%$$

Визначаємо термічний ККД циклу Карно в заданому інтервалі температур:

$$\eta_T^{\text{Карно}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{273 + 30}{273 + 530} = 0,624 \text{ або } 62,4 \%$$

4.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. Визначити термічний ККД паросилової установки, яка працює за циклом Ренкіна, якщо відомо, що тиск пари на вході в турбіну $P_1 = (8 + 0,1 \cdot n)$ МПа і температура $t_1 = (400 + 10 \cdot n)$ °С, а тиск в конденсаторі підтримується на рівні $P_2 = 0,004$ МПа.

2. Визначити витрати водяної пари парової турбіни потужністю $(20 + n)$ тис. кВт · год, початкові параметри якої $P_1 = (8 + 0,1 \cdot n)$ МПа і $t_1 = (400 + 10 \cdot n)$ °С, а тиск в конденсаторі $P_2 = 0,004$ МПа.

3. Паротурбінна установка працює за циклом Ренкіна з початковими параметрами $P_1 = (9 + 0,1 \cdot n)$ МПа і $t_1 = (500 + 10 \cdot n)$ °С. Тиск в конденсаторі $P_2 = 0,004$ МПа. Визначити термічний ККД циклу Ренкіна і Карно в заданому інтервалі температур.

4.3 Контрольні запитання

1. У чому полягає відмінність циклу Карно і циклу Ренкіна? Які їх переваги і недоліки?
2. За рахунок чого можна підвищити середню температуру підведення теплоти в циклі Ренкіна?
3. За рахунок чого можна зменшити середню температуру відведення теплоти і чим вона обмежена?
4. Наведіть формулу визначення термічного ККД за значеннями середньої різниці температур підведення і відведення теплоти.
5. Нарисуйте схему паросилової установки з проміжним перегрівом пари і покажіть на $T - S$ діаграмі процеси, які здійснюються в цьому циклі. Чому сприяє додатковий перегрів пари?
6. Нарисуйте схему регенеративного циклу і пояснить на $T - S$ діаграмі його особливості.
7. Який цикл ми називаємо теплофікаційним і чим він відрізняється від основного циклу Ренкіна? Нарисуйте схему цього циклу.
8. Що ми називаємо теплоелектроцентралями? Нарисуйте принципову схему ТЕЦ.
9. Який цикл ми називаємо парогазовим? Нарисуйте принципову схему такого циклу і в діаграмі $T - S$ відобразіть процеси, які здійснюються в такому циклі.
10. Які переваги парогазового циклу порівняно з окремим паровим і газовим циклами?

5 ХОЛОДОГЕНЕРУЮЧІ УСТАНОВКИ У ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

5.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 5.1. Визначити холодильний коефіцієнт і теоретичну потужність компресійної холодильної установки, що працює за циклом Карно, і яка відводить протягом 1 секунди тепло $Q = 17400$ Дж за -19 °С (температура випарювання), а температура конденсації становить 15 °С.

Розв'язок. Холодильний коефіцієнт установки:

$$\varepsilon_k = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{273 - 1930}{(273 + 15) - (273 - 19)} = 7,47. \quad (5.1)$$

Теоретична потужність установки:

$$N_T = \frac{I_{\text{ц}}}{\tau} = \frac{Q_2}{\varepsilon_k \cdot \tau} = \frac{17400}{7,47 \cdot 1} = 2329 \text{ Вт}. \quad (5.2)$$

Приклад 5.2. Знайти мінімальну роботу циклу Карно, теоретичну потужність компресора аміачної холодильної установки і витрати води в конденсаторі в процесі одержання з води 500 кг/год льоду, якщо відомо, що аміак кипить за температури -7 °С, а конденсується за 20 °С. Відомо також, що вода в конденсаторі нагрівається від 10 до 15 °С.

Розв'язок. Визначаємо теплоту, яка виділяється в процесі замерзання води:

$$Q_2 = G \cdot r = \frac{500 \cdot 339,1 \cdot 1000}{3600} = 47100 \text{ Вт}, \quad (5.3)$$

де $r = 339,1 \cdot 1000$ Дж/кг – теплота замерзання води.

Потужність компресора дорівнюватиме:

$$L_{\text{ц}} = \frac{Q_2}{\varepsilon_k} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \cdot Q_2 = \frac{293 - 266}{266} \cdot 47100 = 4780 \text{ Вт}.$$

Кількість теплоти, відведеної водою в конденсаторі:

$$Q_1 = Q_2 + L_{\text{ц}} = 47100 + 4780 = 51880 \text{ Вт}. \quad (5.4)$$

Кількість води визначається за формулою:

$$G = \frac{Q_1}{c_p \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{51880}{4,187 \cdot 1000 \cdot (15 - 10)} = 2,478 \text{ кг/с}, \quad (5.5)$$

де $c_p = 4,187$ кДж/(кг · К) – питома теплоємність води за $0 \dots 100$ °С, визначається за номограмами.

Приклад 5.3. Визначити для парокомпресійної холодильної машини, яка працює на CO_2 за вологим циклом (в області вологої пари), питому холодовиробність холодоагента, холодильний коефіцієнт, кількість відведеної в конденсаторі теплоти, кількість циркулюючого холодоагента і теоретичну роботу, якщо температура випарювання -30 °С, а температура конденсації 20 °С, температура переохолодження 16 °С, а холодовиробність становить $Q_2 = 58150$ Вт.

Розв'язок. На рис. показано цикл машини в координатах $T - S$. Процес стиснення в компресорі 1-2, процес конденсації 2-3', переохолодження холодоагента 3'-3, процес дроселювання 3-4, випарювання 4-1.

Значення ентальпій визначено з $T - S$ діаграми для CO_2 :

$$i_1 = 590 \text{ кДж/кг}; i_2 = 632 \text{ кДж/кг}; i_3 = i_4 = 461 \text{ кДж/кг}.$$

Питома холодовиробність холодоагента:

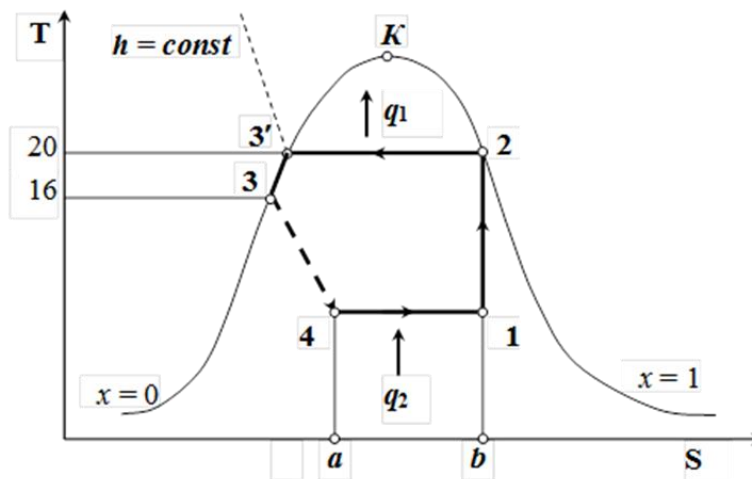
$$q_2 = i_1 - i_4 = 590 - 461 = 129 \text{ кДж/кг}.$$

Кількість теплоти, відведеної в конденсаторі:

$$q_1 = i_2 - i_3 = 632 - 461 = 171 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильний коефіцієнт:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{129}{171 - 129} = 3,07.$$



Витрати холодогента, який циркулює в циклі:

$$G = \frac{Q_2}{q_2} = \frac{58150}{159 \cdot 1000} = 0,448 \text{ кг/с.}$$

Витрати теплоти, яка відводиться в конденсаторі:

$$Q_1 = q_1 \cdot G = 171 \cdot 1000 \cdot 0,448 = 76608 \text{ Вт} = 77 \text{ кВт.}$$

Необхідна теоретична потужність:

$$N_T = G \cdot (i_2 - i_1) = G \cdot (q_1 - q_2) = 0,448 \cdot (632000 - 590000) = 18816 \text{ Вт} = 19 \text{ кВт}$$

5.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. Визначити холодильний коефіцієнт і теоретичну потужність компресійної холодильної установки, що працює за циклом Карно, і яка відводить протягом 1 секунди тепло $Q = (17400 + 100 \cdot n)$ Дж за $(-10 - n)$ °С (температура випарювання), а температура конденсації становить $(15 + n)$ °С.

2. Знайти мінімальну роботу циклу Карно, теоретичну потужність компресора аміачної холодильної установки і витрати води в конденсаторі в процесі одержання з води $(400 + 10 \cdot n)$ кг/год льоду, якщо відомо, що аміак кипить за температури $-(7 + 0,1 \cdot n)$ °С, а конденсується за $(20 + n)$ °С. Відомо також, що вода в конденсаторі нагрівається від $(8 + 0,1 \cdot n)$ до $(14 + 0,1 \cdot n)$ °С.

3. Визначити для пароконпресійної холодильної машини, яка працює на CO₂ за вологим циклом (в області вологої пари), питому холодовиробність холодоагента, холодильний коефіцієнт, кількість відведеної в конденсаторі теплоти, кількість циркулюючого холодоагента і теоретичну роботу, якщо температура випарювання $(-20 - n)$ °С, а температура конденсації $(15 + n)$ °С, температура переохолодження $(12 + 0,1 \cdot n)$ °С, а холодовиробність становить $Q_2 = (45000 + 1000 \cdot n)$ Вт.

5.3 Контрольні запитання

1. Що покладено в основу передачі тепла з нижнього температурного рівня на вищий?
2. За яким циклом працюють холодильні машини і який параметр характеризує ефективність холодильної машини?
3. Чи можна використати повітря як холодильний агент?
4. Які вимоги ставляться до холодильних агентів?
5. Який принцип покладено в основу роботи абсорбційних холодильних установок і яка їх відмінність від компресійних холодильних машин?

6. В чому полягає відмінність теплових насосів від холодильних машин? Покажіть цю відмінність за допомогою T – S діаграми.
7. Як оцінюється ефективність роботи теплових насосів порівняно з холодильними машинами?
8. Поясніть принцип зрідження газів за методом Пікте.
9. В чому полягає відмінність методів зрідження газів Лінде і Клода і які їх переваги і недоліки?
10. В чому полягає відмінність холодильної машини, яка працює за регенеративним циклом високого тиску від низького?

6 ПАЛИВО. ОСНОВИ ГОРІННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

6.1 Приклади розв'язування задач

Приклад 6.1. Розрахувати нижню робочу теплоту згорання вугілля, яке характеризується таким робочим складом: $W^p = 13,0 \%$; $A^p = 21,8 \%$; $S_{\text{п}}^p = 3,0 \%$; $C^p = 49,3 \%$; $H^p = 3,6 \%$; $N^p = 1,0 \%$; $O^p = 8,3 \%$.

Розв'язок. Розраховуємо нижню робочу теплоту згорання вугілля за формулою:

$$Q_{\text{н}}^p = 0,339 \cdot C^p + 1,03 \cdot H^p - 0,109 \cdot (O^p - S_{\text{п}}^p) - 0,025 \cdot W^p; \quad (6.1)$$

$$Q_{\text{н}}^p = 0,339 \cdot 49,3 + 1,03 \cdot 3,6 - 0,109 \cdot (8,3 - 3) - 0,025 \cdot 13 = 19,518 \text{ кДж/кг.}$$

Приклад 6.2. Розрахувати теоретично необхідний об'єм повітря для спалювання 1 кг малосірчастого мазуту марки М 40, який має такий склад: $W^p = 3,0 \%$; $A^p = 0,05 \%$; $S_{\text{п}}^p = 0,3 \%$; $C^p = 84,6 \%$; $H^p = 11,7 \%$; $O^p = 0,3 \%$.

Розв'язок. Об'єм теоретично необхідного повітря для спалювання 1 кг палива виразиться формулою:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S_{\text{п}}^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p; \quad (6.2)$$

$$V^0 = 0,0889 \cdot (84,6 + 0,375 \cdot 0,3) + 0,265 \cdot 11,7 - 0,0333 \cdot 0,3 = 10,641 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Приклад 6.3. Розрахувати склад та об'єм продуктів згорання у разі спалювання мазуту марки М 40, який має такий склад: $W^p = 3,0 \%$; $A^p = 0,05 \%$; $S_{\text{п}}^p = 0,3 \%$; $C^p = 84,6 \%$; $H^p = 11,7 \%$; $O^p = 0,3 \%$ з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,2$ (спалювання без парового дуття).

Розв'язок. В прикладі 6.2. розрахований теоретично необхідний об'єм повітря для спалювання 1 кг мазуту марки М 40. Проведемо розрахунки об'єму продуктів згорання:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,866 \cdot \frac{C^p}{100} = 1,866 \cdot \frac{84,6}{100} = 1,5786 \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (6.3)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \cdot \frac{S_{\text{п}}^p}{100} = 0,7 \cdot \frac{0,3}{100} = 0,0021 \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (6.4)$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^p = 0,79 \cdot 10,641 = 8,406 \text{ нм}^3/\text{кг.} \quad (6.5)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,016 \cdot V^0; \quad (6.6)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot 11,7 + 0,0124 \cdot 3 + 0,016 \cdot 10,641 = 1,506 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Із врахуванням надлишку повітря проведемо розрахунок об'єму сухих газів за формулою:

$$V_{\text{с.г.}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0; \quad (6.7)$$

$$V_{\text{с.г.}} = 1,5786 + 0,0021 + 8,406 + (1,2 - 1) \cdot 10,641 = 12,1149 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Із врахуванням надлишку повітря проведемо розрахунок об'єму водяної пари за формулою:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0; \quad (6.8)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,506 + 0,0161 \cdot (1,2 - 1) \cdot 10,641 = 1,5402 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Визначаємо повний об'єм газів:

$$V_r = V_{c.r.} + V_{H_2O} = 12,1149 + 1,5402 = 13,6551 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (6.9)$$

Приклад 6.4. Розрахувати ентальпію продуктів згоряння мазуту марки М40. Температура газів 600 °С. Для розрахунків використати об'єми продуктів згоряння, отримані з розрахунків у прикладі 6.3.

Розв'язок. Визначаємо ентальпію продуктів згоряння:

$$H_r^0 = V_{RO_2} \cdot c_{RO_2} \cdot t_{RO_2} + V_{N_2}^0 \cdot c_{N_2} \cdot t_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot c_{H_2O} \cdot t_{H_2O}; \quad (6.10)$$

$$H_r^0 = 1,5786 \cdot 2,045 \cdot 600 + 0,0021 \cdot 2,045 \cdot 600 + 8,406 \cdot 1,398 \cdot 600 + 1,506 \cdot 1,614 \cdot 600 = 10145$$

$$H_r^0 = H_r^0 + (\alpha - 1) \cdot H_n^0; \quad (6.11)$$

$$H_n^0 = V_n^0 \cdot c_n \cdot t_n = 10,641 \cdot 1,368 \cdot 600 = 8734 \text{ кДж/кг мазуту}; \quad (6.12)$$

$$H_r^0 = 10145 + (1,2 - 1) \cdot 8734 = 11892 \text{ кДж/кг мазуту}.$$

6.2 Завдання для самостійної роботи

n – номер варіанта.

1. Розрахувати теоретично необхідний об'єм повітря для спалювання 1 кг мазуту, який має такий склад: $W^p = (3,0 + 0,1 \cdot n) \%$; $A^p = 0,05 \%$; $S_n^p = 0,3 \%$; $C^p = (84,6 - 0,1 \cdot n) \%$; $H^p = (11,7 - 0,1 \cdot n) \%$; $O^p = (0,3 + 0,1 \cdot n) \%$.

2. Розрахувати склад та об'єм продуктів згоряння у разі спалювання мазуту, який має склад, наведений у попередньому завданні з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = (1,2 + 0,1 \cdot n)$ (спалювання без парового дуття).

3. Розрахувати ентальпію продуктів згоряння мазуту, який має склад, наведений у попередньому завданні. Температура газів $(500 + 10 \cdot n) \text{ }^\circ\text{C}$. Для розрахунків використати об'єми продуктів згоряння, отримані з розрахунків у попередньому прикладі.

6.3 Контрольні запитання

1. Що ми називаємо робочою, сухою та горючою масою твердого та рідкого палива?
2. Наведіть формули перерахунку із сухої та робочої мас палива на горючу.
3. Наведіть формулу перерахунку вмісту компонентів вологого газу, використовуючи відомий вміст сухого газу та пояснить її суть.
4. Сформулюйте зв'язок між вищою та нижчою теплотою горіння палива.
5. Як розраховується теплота згоряння твердого, рідкого та газоподібного палива?
6. Сформулюйте принципи розрахунку витрати повітря на спалювання 1 кг палива.
7. як досягається повнота спалювання палива в реальних умовах із врахуванням недосконалості організації процесу горіння?
8. Як розраховується ентальпія продуктів згоряння?
9. Які тенденції розвитку паливної бази України?
10. Якими шляхами досягається зменшення кількості SO_3 в продуктах згоряння?

ЛІТЕРАТУРА

1. Конспект лекцій з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів" для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Уклад.: Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, Л.В. Тимошевська, Нац. ун-т "Одеська політехніка". – Одеса, 2022. – 92 с.
2. Теплотехніка: Підручник для втузів / Б.Х. Драганов, А.А. Долинський, А.В. Міщенко та ін.; За ред. Б.Х. Драганова. – К.: ІНКООС, 2005. – 504 с. Режим доступу: http://kekte.at.ua/_ld/0/53____.pdf

3. Семенишин Є.М. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів: навчальний посібник / Є.М. Семенишин, М.С. Мальований – Львів: Видавництво національного університету "Львівська політехніка", 2005. – 420 с.
4. Чечеткин А.В. Теплотехника / А.В. Чечеткин, Н.А. Занемонец – М.: Высшая Школа, 1986. – 344 с.
5. Архаров А.М. Теплотехника / А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожинов И.А. – М.: Машиностроение, 1986. 8. Баскаков А.П. Теплотехника / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др. – М.: Энергоиздат, 1991. – 224 с. (55 прим.)
6. Куперман В.И. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности / В.И. Куперман, С.А. Романовский, Л.Н. Сидельковский – К.: Высш. шк., 1986.
7. Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский – М.: Энергоиздат, 1981.
8. Эксергетические расчеты технических систем : справ. пособие / В.М. Бродянский, Г.П. Верховкер, С.В. Дубковский [и др.] – К.: Наук. Думка, 1991. – 360 с.
9. Лейтес И.Л. Теория и практика химической энерготехнологии / И.Л. Лейтес, М.Х. Сосна, В.П. Семенов – М.: Химия, 1988. – 280 с.
10. Бродянский В.М. Эксергетический анализ и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек – М.: Энергоатомиздат, 1996.
11. Сборник задач и упражнений по курсу "Энерготехнология химико-технологических процессов" / С.А. Куманев, И.А. Василенко, А.А. Пивоваров, В.Е. Никольский – Днепропетровск : УГХТУ
12. Баскаков А.П. Теплотехника / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др. – М.: Энергоиздат, 1991. – 224 с. Режим доступа: http://sait.at.ua/_ld/0/92_tep11.pdf
13. Теплотехника. Учебник для вузов / Под общ. ред. Крутова И.В. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с. Режим доступа: http://www.techgidravlika.ru/view_book.php?id=188