

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРНОЇ ТА СПЕЦІАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ
КАФЕДРА РАДІАЦІЙНОГО І ХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник кафедри

Радіаційного і хімічного захисту

_____ Віталій НУЯНЗІН

" ____ " _____ 2025 р.

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи для здобувачів вищої освіти
за заочною (дистанційною) формою навчання з навчальної дисципліни
«Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів»

за освітньо-професійною програмою «Радіаційний та хімічний захист»
підготовки за першим (бакалаврським) ступенем вищої освіти
у галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія»
за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія»

Розглянуто та ухвалено засіданням кафедри
радіаційного і хімічного захисту

протокол № _____ від « ____ » _____ 2025р.

Черкаси – 2025 рік

Матеріал, наведений в Методичних вказівках, містить три розрахункові (контрольні) роботи, дві з яких відносяться до розділу "Теоретичні основи аналізу енергоефективності", а третя - до розділу "Основи енергозбереження". Кожна з розрахункових робіт представлена в різних варіантах, які відрізняються вихідними даними. Номер варіанту для кожного здобувача визначає викладач.

При виконанні роботи необхідно дотримуватися таких вимог:

- робота повинна бути грамотно та охайно оформлена;
- умови завдання повинні бути виписаними;
- рішення має включати в себе короткий пояснювальний текст, в якому вказано яка величина визначається та яка формула для цього використовується, які величини містить ця формула та звідки вони беруться (з умови задачі, з довідника, визначені раніше і т.д.);
- обчислення дається в розгорнутому вигляді;
- обов'язково слід вказувати розмірність фізичних величин.

Контрольна робота повинна бути вчасно відправлена на перевірку. Слухачі-заочники, які без поважної причини в термін не подали контрольну роботу, на екзаменаційну сесію не допускаються.

Контрольна робота, яка виконана не за своїм варіантом або не повністю висвітлює питання завдання, до заліку не приймається. Така робота повинна бути зроблена повторно з урахуванням зауважень викладача.

В Методичних вказівках наведені приклади, які дають змогу виконати всі розрахунки без звертання до інших літературних джерел. Проте, для розуміння отриманих результатів необхідно проробити відповідний лекційний матеріал.

При пошуку значення функції $y(x)$ за допомогою таблиць у разі попадання аргументу функції між табличними значеннями x_1 і x_2 слід скористатися якою-небудь інтерполяційною формулою, наприклад формулою лінійної інтерполяції:

$$y(x) = y(x_1) + \frac{y(x_2) - y(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

Розробник(и):

(підпис) Андрій ШАРШАНОВ

(підпис) Лариса ТРЕФІЛОВА

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА №1

Задача 1. Параметри суміші газів. Процеси з ідеальним газом

Суміш газів (молекулярні азот N_2 , кисень O_2 та вуглекислий газ CO_2) задана своїм об'ємним складом (дивись Таблицю 1). Початкова температура суміші $t_1 = 20$ °С, початковий тиск суміші $P_1 = 101.3$ кПа, маса суміші $m_{\text{сум}} = 1$ кг.

Вважаючи компоненти суміші ідеальними газами, розрахувати:

- 1) молярну масу суміші;
- 2) молярний та масовий склад суміші (в процентах та в кіломолях і кілограмах, відповідно);
- 3) парціальні тиски компонент суміші;
- 4) питомі газові сталі компонент та питому газову сталу суміші;
- 5) загальний об'єм та густину суміші; зведені (парціальні) об'єми, що займають компоненти суміші.

Вважаючи, що питома (масова) ізохорна теплоємність дорівнює для N_2 - $c_{vN_2} = 0.743$ кДж/(кг·К), для O_2 - $c_{vO_2} = 0.659$ кДж/(кг·К), для CO_2 - $c_{vCO_2} = 0.651$ кДж/(кг·К), розрахувати:

- 6) питому (масову) ізохорну теплоємність суміші;
- 7) питому (об'ємну) ізохорну теплоємність суміші;
- 8) питому (молярну) ізохорну теплоємність кожної із компонент суміші та суміші в цілому;
- 9) питому (масову) ізобарну теплоємність кожної із компонент суміші та суміші в цілому.

Нехтуючи залежністю теплоємності від температури, розрахувати:

- 10) внутрішню енергію кожної із компонент суміші U_i , беручи за початок відліку внутрішню енергію компонент при температурі $t_0 = 0$ °С - U_{0i} (тобто приймаємо $U_{0N_2} = U_{0O_2} = U_{0CO_2} = 0$);

- 11) внутрішню енергію суміші;
- 12) ентальпію кожної із компонент суміші та суміші в цілому;
- 13) показник адіабати кожної із компонент суміші та суміші в цілому.

Далі окремо вивчаються п'ять оборотних процесів, що переводять суміш із початкового стану (P_1, t_1, V_1) у кінцевий стан (P_2, t_2, V_2).

Розглянути ізобарне розширення суміші до кінцевої температури t_2 , °С (дивись таблицю 1). Розрахувати:

- 14) кінцевий об'єм суміші;
- 15) кінцеву внутрішню енергію та її зміну;
- 16) кінцеву ентальпію та її зміну;
- 17) роботу, що супроводжує розширення суміші;
- 18) теплоту, що передається у процесі.

Розглянути процеси (ізотермічний, ізохорний, адіабатний, політропний), при яких тиск суміші досягне P_2 , кПа (дивись таблицю 4).

Вважаючи процес ізотермічним, розрахувати:

- 19) кінцевий об'єм суміші;
- 20) кінцеву внутрішню енергію та її зміну;

- 21) кінцеву ентальпію та її зміну;
- 22) роботу, що витрачена на розширення суміші;
- 23) теплоту, що передається у процесі.

Вважаючи процес ізохорним, розрахувати:

- 24) кінцеву температуру суміші;
- 25) кінцеву внутрішню енергію та її зміну;
- 26) кінцеву ентальпію та її зміну;
- 27) роботу, що витрачена на розширення суміші;
- 28) теплоту, що передається у процесі.

Вважаючи процес адіабатним, розрахувати:

- 29) кінцевий об'єм суміші;
- 30) кінцеву температуру суміші;
- 31) кінцеву внутрішню енергію та її зміну;
- 32) кінцеву ентальпію та її зміну;
- 33) роботу, що витрачена на розширення суміші;
- 34) теплоту, що передається у процесі.

Вважаючи процес політропним з показником політропи n (дивись таблицю 4), розрахувати:

- 35) кінцевий об'єм суміші;
- 36) кінцеву температуру суміші;
- 37) кінцеву внутрішню енергію та її зміну;
- 38) кінцеву ентальпію та її зміну;
- 39) роботу, що витрачена на розширення суміші;
- 40) теплоту, що передається у процесі.

Таблиця 1.1. - Варіанти даних до задачі 1 з розрахункової роботи РР-1

Остання цифра шифру	Об'ємні частки, %			Передостання цифра шифру	t_2 , °C	P_2 кПа	n
	N_2	O_2	CO_2				
0	10	85	5	0	280	470	1.1
1	18	80	2	1	120	400	0.6
2	25	70	5	2	160	350	1.7
3	37	43	20	3	200	330	1.6
4	45	45	10	4	240	310	1.5
5	60	33	7	5	280	470	1.1
6	70	20	10	6	350	540	0.5
7	78	21	1	7	400	570	0.8
8	80	15	5	8	450	620	0.7
9	90	2	8	9	500	660	1.3

Задача 2. Розрахунок термодинамічних процесів зміни стану водяної пари.

До одного кілограму водяної пари, яка має початковий тиск P_1 і ступінь сухості x_1 , підводиться теплота q . Використовуючи i - s -діаграму водяної пари дослідити два процеси:

- А) ізотермічне розширення із початкового стану;
- Б) ізобарне розширення із початкового стану.

У кожному з випадків визначити:

1) параметри кінцевого стану пари

(у випадку “А” – P_2 - тиск, v_2 - питомий об’єм, i_2 - питому ентальпію, s_2 - питому ентропію, u_2 - питому внутрішню енергію;

у випадку “Б” – T_3 - температуру, v_3 - питомий об’єм, i_3 - питому ентальпію, s_3 - питому ентропію, u_3 - питому внутрішню енергію);

2) зміну внутрішньої енергії Δu ;

3) зміну ентальпії Δi ;

4) зміну ентропії Δs ;

5) роботу розширення l .

Таблиця 1.2. Варіанти даних до задачі 2 з розрахункової роботи РР-1

Остання Цифра шифру	P_1 , МПа	x_1	Передостання цифра шифру	q , кДж/кг
0	2,5	0.97	0	500
1	3	0.96	1	480
2	3,5	0.95	2	460
3	4	0.94	3	440
4	4,5	0.93	4	420
5	5	0.92	5	410
6	6	0.91	6	430
7	4	0.90	7	450
8	3	0.91	8	470
9	2.5	0.92	9	490

ВКАЗІВКИ ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧ РР-1

Задача 1.

Методика розрахунку супроводжується чисельним прикладом суміші із об’ємним складом: N_2 - 65%, O_2 - 25%, CO_2 - 10%, і параметрами процесів: $t_2 = 300$ °С, $P_2 = 400$ кПа, $n = 1.55$.

1. Молярна маса суміші розраховується за формулою:

$$\mu_{\text{сум}} = \sum_i \mu_i r_i ,$$

де i - індекс, що вказує на компоненти суміші (N_2 , O_2 , CO_2); сума береться по усім компонентам; μ_i - молярні маси газів ($\mu_{N_2} = 14 \cdot 2 = 28$ кг/кмоль, $\mu_{O_2} = 16 \cdot 2 = 32$ кг/кмоль, $\mu_{CO_2} = 12 + 16 \cdot 2 = 44$ кг/кмоль); r_i - об’ємна частка i -го компонента.

$$\mu_{\text{сум}} = 0.65 \cdot 28 + 0.25 \cdot 32 + 0.10 \cdot 44 = 30.6 \text{ кг/кмоль}.$$

Тут і далі при розрахунках усі частки виражаються прямо (а не в процентах).

2. Молярні частки збігаються з об’ємними (із r_i), а масові (g_i) розраховуються за формулою:

$$g_i = \mu_i r_i / \mu_{\text{сум}} .$$

$$g_{N_2} = 28 \cdot 0.65 / 30.6 = 0.595 ;$$

$$g_{O_2} = 32 \cdot 0.25 / 30.6 = 0.261 ;$$

$$g_{CO_2} = 44 \cdot 0.10 / 30.6 = 0.144 .$$

Маси компонент розраховуються за формулами:

$$m_i = g_i \cdot m_{\text{сум}} .$$

$$m_{N2} = 0.595 \cdot 1 = 0.595 \text{ кг};$$

$$m_{O2} = 0.261 \cdot 1 = 0.261 \text{ кг};$$

$$m_{CO2} = 0.144 \cdot 1 = 0.144 \text{ кг}.$$

Кількість молей розраховується за формулами:

$$\nu_i = m_i / \mu_i,$$

$$\nu_{\text{сум}} = m_{\text{сум}} / \mu_{\text{сум}} \text{ або } \nu_{\text{сум}} = \sum_i \nu_i.$$

$$\nu_{N2} = 0.595 / 28 = 0.0213 \text{ кмоль};$$

$$\nu_{O2} = 0.261 / 32 = 0.00816 \text{ кмоль};$$

$$\nu_{CO2} = 0.144 / 44 = 0.00327 \text{ кмоль};$$

$$\nu_{\text{сум}} = 1 / 30.6 = 0.0327 \text{ кмоль};$$

$$\nu_{\text{сум}} = 0.0213 + 0.00816 + 0.00327 = 0.0327 \text{ кмоль}.$$

3. Парціальний тиск i -го компонента розраховується за формулою:

$$P_i = r_i \cdot P_1.$$

$$P_{N2} = 0.65 \cdot 101.3 = 65.8 \text{ кПа};$$

$$P_{O2} = 0.25 \cdot 101.3 = 25.3 \text{ кПа};$$

$$P_{CO2} = 0.10 \cdot 101.3 = 10.1 \text{ кПа}.$$

4. Питомі газові сталі компонент суміші та самої суміші розраховуються за формулами:

$$R_i = R_o / \mu_i, \quad R_{\text{сум}} = R_o / \mu_{\text{сум}},$$

де $R_o = 8.314 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$ - універсальна газова стала.

$$R_{N2} = 8.314 / 28 = 0.297 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$R_{O2} = 8.314 / 32 = 0.260 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$R_{CO2} = 8.314 / 44 = 0.189 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$R_{\text{сум}} = 8.314 / 30.6 = 0.272 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

5. Об'єм суміші V_1 отримуємо із рівняння стану суміші ідеальних газів:

$$V_1 = m_{\text{сум}} \cdot R_{\text{сум}} \cdot T_1 / P_1, \quad \text{де } T_1 = t_1 + 273, \text{ К}.$$

$$V_1 = 1 \cdot 0.272 \cdot (20 + 273) / 101.3 = 0.787 \text{ м}^3.$$

Парціальний об'єм i -ої компоненти дорівнює:

$$V_i = r_i \cdot V_1.$$

$$V_{N2} = 0.65 \cdot 0.787 = 0.512 \text{ м}^3;$$

$$V_{O2} = 0.25 \cdot 0.787 = 0.197 \text{ м}^3;$$

$$V_{CO2} = 0.10 \cdot 0.787 = 0.0787 \text{ м}^3.$$

Густина суміші дорівнює:

$$\rho_{\text{сум}} = m_{\text{сум}} / V_1.$$

$$\rho_{\text{сум}} = 1 / 0.787 = 1.27 \text{ кг/м}^3.$$

6. Питома (масова) ізохорна теплоємність суміші дорівнює:

$$c_{v \text{ сум}} = \sum_i g_i \cdot c_{v i},$$

де $c_{v i}$ - питомі (масові) ізохорні теплоємності відповідних компонент суміші, Дж/(кг·К) (значення $c_{v i}$ наведені в умовах задачі).

$$c_{v \text{ сум}} = 0.595 \cdot 0.743 + 0.261 \cdot 0.659 + 0.144 \cdot 0.651 = 0.708 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

7. Питома (об'ємна) ізохорна теплоємність суміші дорівнює:

$$c_{v \text{ сум}}' = \rho_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}},$$

$$c_{v \text{ сум}}' = 1.27 \cdot 0.708 = 0.899 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)}.$$

8. Питомі (кіломолярні) ізохорні теплоємності компонент суміші та самої суміші розраховуються за формулами:

$$c_{v \mu i} = c_{v i} \cdot \mu_i,$$

$$c_{v \mu \text{ сум}} = c_{v \text{ сум}} \cdot \mu_{\text{сум}}.$$

або

$$c_{v \mu \text{ сум}} = \sum_i r_i \cdot c_{v \mu i}.$$

$$c_{v \mu N_2} = 0.743 \cdot 28 = 20.8 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)};$$

$$c_{v \mu O_2} = 0.659 \cdot 32 = 21.1 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)};$$

$$c_{v \mu CO_2} = 0.651 \cdot 44 = 28.6 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)};$$

$$c_{v \mu \text{ сум}} = 0.708 \cdot 30.6 = 21.7 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)}.$$

$$c_{v \mu \text{ сум}} = 0.65 \cdot 20.8 + 0.25 \cdot 21.1 + 0.10 \cdot 28.6 = 21.7 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)}.$$

9. Питомі (масові) ізобарні теплоємності компонент суміші та самої суміші розраховуються за формулами:

$$c_{p i} = c_{v i} + R_i,$$

$$c_{p \text{ сум}} = c_{v \text{ сум}} + R_{\text{сум}},$$

або

$$c_{p \text{ сум}} = \sum_i g_i \cdot c_{p i}.$$

$$c_{p N_2} = 0.743 + 0.297 = 1.040 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$c_{p O_2} = 0.659 + 0.260 = 0.919 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$c_{p CO_2} = 0.651 + 0.189 = 0.840 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$c_{p \text{ сум}} = 0.708 + 0.272 = 0.980 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$c_{p \text{ сум}} = 0.595 \cdot 1.040 + 0.261 \cdot 0.919 + 0.144 \cdot 0.840 = 0.980 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

10. Внутрішня енергія компонент суміші дорівнює (з урахуванням умови $U_{0 N_2} = U_{0 O_2} = U_{0 CO_2} = 0$)

$$U_i = U_{0 i} + c_{v i} \cdot m_i \cdot (t_1 - t_0) = c_{v i} \cdot m_i \cdot (t_1 - t_0).$$

$$U_{N_2} = 0.743 \cdot 0.595 \cdot (20 - 0) = 8.84 \text{ кДж};$$

$$U_{O_2} = 0.659 \cdot 0.261 \cdot (20 - 0) = 3.44 \text{ кДж};$$

$$U_{CO_2} = 0.651 \cdot 0.144 \cdot (20 - 0) = 1.87 \text{ кДж}.$$

11. Внутрішня енергія суміші дорівнює (з урахуванням співвідношення $U_0 = U_{0 N_2} + U_{0 O_2} + U_{0 CO_2}$)

$$U_I = U_0 + c_{v \text{ сум}} \cdot m_{\text{сум}} \cdot (t_1 - t_0) = c_{v \text{ сум}} \cdot m_{\text{сум}} \cdot (t_1 - t_0),$$

або

$$U_I = \sum_i U_i.$$

$$U_I = 0.708 \cdot 1 \cdot (20 - 0) = 14.2 \text{ кДж};$$

або

$$U_I = 8.84 + 3.44 + 1.87 = 14.2 \text{ кДж}.$$

12. Ентальпія i -ой компоненти суміші дорівнює:

$$I_i = U_i + P_i \cdot V_i$$

$$I_{N_2} = 8.84 + 101.3 \cdot 0.512 = 60.7 \text{ кДж};$$

$$I_{O_2} = 3.44 + 101.3 \cdot 0.197 = 23.4 \text{ кДж};$$

$$I_{CO_2} = 1.87 + 101.3 \cdot 0.0787 = 9.84 \text{ кДж}.$$

Ентальпія суміші дорівнює:

$$I_1 = \sum_i I_i$$

або

$$I_1 = U_1 + P_1 \cdot V_1.$$

$$I_1 = 60.7 + 23.4 + 9.84 = 93.9 \text{ кДж};$$

$$I_1 = 14.2 + 101.3 \cdot 0.787 = 93.9 \text{ кДж}.$$

13. Показник адіабати i -ой компоненти дорівнює:

$$k_i = c_{p i} / c_{v i} = (c_{v i} + R_i) / c_{v i} = 1 + R_i / c_{v i}.$$

$$k_{N_2} = 1 + 0.297 / 0.743 = 1.40 ;$$

$$k_{O_2} = 1 + 0.260 / 0.659 = 1.39 ;$$

$$k_{CO_2} = 1 + 0.189 / 0.651 = 1.29 .$$

Показник адіабати суміші дорівнює:

$$k_{\text{сум}} = c_{p \text{ сум}} / c_{v \text{ сум}} = (c_{v \text{ сум}} + R_{\text{сум}}) / c_{v \text{ сум}} = 1 + R_{\text{сум}} / c_{v \text{ сум}}$$

або

$$k_{\text{сум}} = 1 + \frac{1}{\sum_i \frac{r_i}{k_i - 1}}$$

$$k_{\text{сум}} = 1 + 0.272 / 0.708 = 1.384 ;$$

або

$$k_{\text{сум}} = 1 + \frac{1}{\frac{0.65}{1.40 - 1} + \frac{0.25}{1.39 - 1} + \frac{0.10}{1.29 - 1}} = 1.384$$

Процеси

Ізобарний процес ($P_2 = P_1$).

14. Кінцевий об'єм суміші розраховується за формулою:

$$V_2 = V_1 \cdot T_2 / T_1 = V_1 \cdot (t_2 + 273) / (t_1 + 273) .$$

$$V_2 = 0.787 \cdot (300 + 273) / (20 + 273) = 1.539 \text{ м}^3.$$

15. Кінцева внутрішня енергія суміші дорівнює:

$$U_2 = U_0 + m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) .$$

$$U_2 = 1 \cdot 0.708 \cdot (300 - 0) = 212.4 \text{ кДж}.$$

Зміна внутрішньої енергії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1$$

або

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 212.4 - 14.2 = 198.2 \text{ кДж};$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.708 \cdot (300 - 20) = 198.2 \text{ кДж.}$$

16. Кінцева ентальпія суміші дорівнює:

$$I_2 = U_2 + P_2 \cdot V_2 .$$

$$I_2 = 212.4 + 101.3 \cdot 1.539 = 368.3 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = I_2 - I_1 ,$$

або

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{p \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 368.3 - 93.9 = 274.4 \text{ кДж;}$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.980 \cdot (300 - 20) = 274.4 \text{ кДж.}$$

17. Робота, яку витрачено на розширення суміші, дорівнює:

$$L = P_1 \cdot (V_2 - V_1) .$$

$$L = 101.3 \cdot (1.539 - 0.787) = 76.2 \text{ кДж.}$$

18. Теплота процесу:

$$Q = \Delta U_{1 \rightarrow 2} + L$$

або

$$Q = \Delta I_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{p \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$Q = 198.2 + 76.2 = 274.4 \text{ кДж;}$$

$$Q = 1 \cdot 0.980 \cdot (300 - 20) = 274.4 \text{ кДж.}$$

Ізотермічний процес ($t_2 = t_1$).

19. Кінцевий об'єм суміші розраховується за формулою:

$$V_2 = V_1 \cdot P_1 / P_2 .$$

$$V_2 = 0.787 \cdot 101.3 / 400 = 0.1993 \text{ м}^3 .$$

20. Кінцева внутрішня енергія суміші

$$U_2 = U_0 + m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) .$$

$$U_2 = 1 \cdot 0.708 \cdot (20 - 0) = 14.2 \text{ кДж.}$$

Зміна внутрішньої енергії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1$$

або

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 14.2 - 14.2 = 0 \text{ кДж.}$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.708 \cdot (20 - 20) = 0 \text{ кДж.}$$

21. Кінцева ентальпія суміші дорівнює:

$$I_2 = U_2 + P_2 \cdot V_2 .$$

$$I_2 = 14.2 + 400 \cdot 0.1993 = 93.9 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = I_2 - I_1 ,$$

або

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{p \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 93.6 - 93.6 = 0 \text{ кДж.}$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.980 \cdot (20 - 20) = 0 \text{ кДж.}$$

22. Робота, яку витрачено на розширення суміші, дорівнює:

$$L = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln(V_2/V_1) = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln(P_1/P_2) .$$

$$L = 101.3 \cdot 0.787 \cdot \ln(101.3/400) = - 109.5 \text{ кДж.}$$

23. Теплота процесу:

$$Q = \Delta U_{1 \rightarrow 2} + L = L .$$

$$Q = - 109.5 \text{ кДж.}$$

Ізохорний процес ($V_2 = V_1$).

24. Кінцева температура суміші розраховується за формулою:

$$T_2 = T_1 \cdot P_2/P_1, \text{ К ; } t_2 = T_2 - 273, \text{ } ^\circ\text{C} .$$

$$T_2 = (20+273) \cdot 400/101.3 = 1157 \text{ К; } t_2 = 1157 - 273 = 884 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

25. Кінцева внутрішня енергія суміші:

$$U_2 = U_0 + m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) .$$

$$U_2 = 1 \cdot 0.708 \cdot (884 - 0) = 625.9 \text{ кДж.}$$

Зміна внутрішньої енергії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1$$

або

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 625.9 - 14.2 = 611.7 \text{ кДж;}$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.708 \cdot (884 - 20) = 611.7 \text{ кДж.}$$

26. Кінцева ентальпія суміші дорівнює:

$$I_2 = U_2 + P_2 \cdot V_2 .$$

$$I_2 = 625.9 + 400 \cdot 0.787 = 940.7 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = I_2 - I_1 ,$$

або

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{p \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 940.7 - 93.9 = 846.8 \text{ кДж;}$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.980 \cdot (884 - 20) = 846.7 \text{ кДж.}$$

27. Робота, яку витрачено на розширення суміші, дорівнює:

$$L = 0, \text{ кДж.}$$

28. Теплота процесу:

$$Q = \Delta U_{1 \rightarrow 2} + L = \Delta U_{1 \rightarrow 2} ,$$

тобто

$$Q = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1) .$$

$$Q = 1 \cdot 0.708 \cdot (884 - 20) = 611.7 \text{ кДж.}$$

Адіабатний процес ($Q = 0$).

29. Кінцевий об'єм суміші розраховується за формулою:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k_{\text{сум}}}}$$

$$V_2 = 0.787 \cdot \left(\frac{101.3}{400} \right)^{\frac{1}{1.384}} = 0.292 \text{ м}^3.$$

30. Кінцева температура суміші розраховується за формулою:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k_{\text{сум}}-1}{k_{\text{сум}}}}, \text{ K}; \quad t_2 = T_2 - 273, ^\circ\text{C}.$$

$$T_2 = (20 + 273) \cdot \left(\frac{400}{101.3} \right)^{\frac{1.384-1}{1.384}} = 429 \text{ K}, \quad t_2 = 429 - 273 = 156, ^\circ\text{C}.$$

31. Кінцева внутрішня енергія суміші:

$$U_2 = U_0 + m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0).$$

$$U_2 = 1 \cdot 0.708 \cdot (156 - 0) = 110.4 \text{ кДж}.$$

Зміна внутрішньої енергії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1$$

або

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1).$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 110.4 - 14.2 = 96.2 \text{ кДж};$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.708 \cdot (156 - 20) = 96.3 \text{ кДж}.$$

32. Кінцева ентальпія суміші дорівнює:

$$I_2 = U_2 + P_2 \cdot V_2.$$

$$I_2 = 110.4 + 400 \cdot 0.292 = 227.2 \text{ кДж}.$$

Зміна ентальпії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = I_2 - I_1,$$

або

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{p \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1).$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 227.2 - 93.9 = 133.3 \text{ кДж};$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.980 \cdot (156 - 20) = 133.3 \text{ кДж}.$$

33. Робота, яку витрачено на розширення суміші, дорівнює

$$L = \frac{P_1 \cdot V_1}{k_{\text{сум}} - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k_{\text{сум}} - 1}{k_{\text{сум}}}} \right] = \frac{P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2}{k_{\text{сум}} - 1},$$

або

$$L = - \Delta U_{1 \rightarrow 2}.$$

$$L = \frac{101.3 \cdot 0.787}{1.384 - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{400}{101.3} \right)^{\frac{1.384-1}{1.384}} \right] = -96.3 \text{ кДж.}$$

$$L = \frac{101.3 \cdot 0.787 - 400 \cdot 0.292}{1.384 - 1} = -96.6 \text{ кДж.}$$

$$L = -\Delta U_{1 \rightarrow 2} = -96.3 \text{ кДж.}$$

34. Теплота процесу:

$$Q = 0, \text{ кДж.}$$

Політропний процес.

35. Кінцевий об'єм суміші розраховується за формулою:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

$$V_2 = 0.787 \cdot \left(\frac{101.3}{400} \right)^{\frac{1}{1.55}} = 0.324 \text{ м}^3.$$

36. Кінцева температура суміші розраховується за формулою:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \text{ К; } t_2 = T_2 - 273, ^\circ\text{C}.$$

$$T_2 = (20 + 273) \cdot \left(\frac{400}{101.3} \right)^{\frac{1.55-1}{1.55}} = 477 \text{ К, } t_2 = 477 - 273 = 204, ^\circ\text{C}.$$

37. Кінцева внутрішня енергія суміші:

$$U_2 = U_0 + m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0) = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_0).$$

$$U_2 = 1 \cdot 0.708 \cdot (204 - 0) = 144.4 \text{ кДж.}$$

Зміна внутрішньої енергії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1$$

або

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{v \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1).$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 144.4 - 14.2 = 130.2 \text{ кДж;}$$

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.708 \cdot (204 - 20) = 130.3 \text{ кДж.}$$

38. Кінцева ентальпія суміші дорівнює:

$$I_2 = U_2 + P_2 \cdot V_2.$$

$$I_2 = 144.4 + 400 \cdot 0.324 = 274.0 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії суміші у процесі дорівнює:

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = I_2 - I_1,$$

або

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = m_{\text{сум}} \cdot c_{p \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1).$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 274.0 - 93.9 = 180.1 \text{ кДж;}$$

$$\Delta I_{1 \rightarrow 2} = 1 \cdot 0.980 \cdot (204 - 20) = 180.3 \text{ кДж.}$$

39. Робота, яку витрачено на розширення суміші, дорівнює:

$$L = \frac{P_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{P_1 \cdot V_1 - P_2 \cdot V_2}{n-1},$$

$$L = \frac{101.3 \cdot 0.787}{1.55 - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{400}{101.3} \right)^{\frac{1.55-1}{1.55}} \right] = -91.0 \text{ кДж.}$$

$$L = \frac{101.3 \cdot 0.787 - 400 \cdot 0.324}{1.55 - 1} = -90.7 \text{ кДж.}$$

40. Теплота процесу:

$$Q = \Delta U_{1 \rightarrow 2} + L,$$

або

$$Q = m_{\text{сум}} \cdot c_{n \text{ сум}} \cdot (t_2 - t_1).$$

де

$$c_{n \text{ сум}} = c_{v \text{ сум}} \cdot (n-k)/(n-1)$$

- питома (масова) теплоємність суміші у політропному процесі.

$$Q = 130.2 + (-91.0) = 39.2 \text{ кДж.}$$

$$c_{n \text{ сум}} = 0.708 \cdot (1.55 - 1.384)/(1.55 - 1) = 0.214 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$Q = 1 \cdot 0.214 \cdot (204 - 20) = 39.4 \text{ кДж.}$$

Задача 2

Для опису стану речовини можна користуватися будь-якою парою термодинамічних параметрів. Ми будемо використовувати i - s -діаграму, бо вона зручна при обчисленні енергетичних величин (теплоти та роботи). На Рис. 1.1 приведено її схематичне зображення у випадку водяної пари.

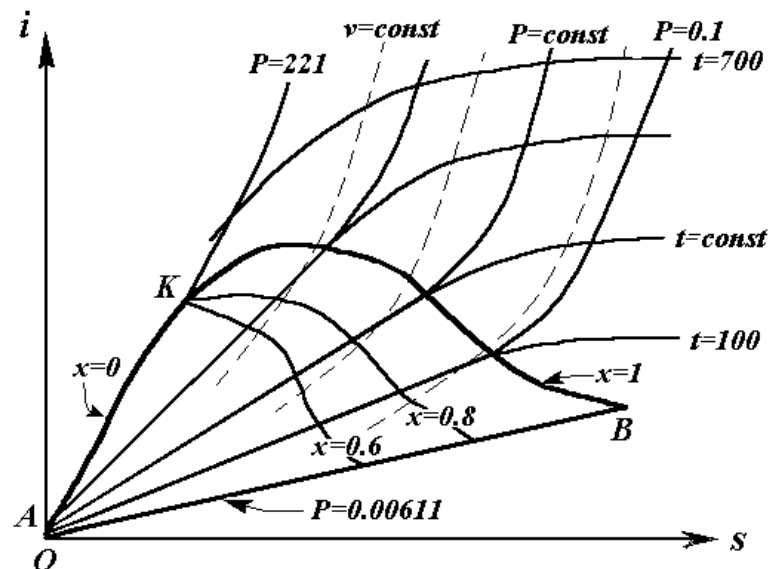


Рис. 1.1. Схематичне зображення i - s -діаграми водяної пари. Значення тиску P наводиться у барах, температури t – у градусах Цельсія, ступеня сухості x – у долях.

Опишемо основні особливості цієї діаграми. Критична точка K розміщена ліворуч від максимуму пограничної кривої AKB . Нижня погранична крива відповідає лінії AK . Верхня погранична крива KB закінчується у точці B . На діаграмі нанесено ізо-

бару **OB** ($P = 0.00611$ бар), яка відповідає тиску у потрійній точці. Область нижче відповідає двохфазній суміші "пара - льод".

Лінія **KB** відповідає стану сухої насиченої пари ($x=1$). Вона відокремлює області вологої насиченої від області перегрітої пари.

Область, обмежена ізобарою **OB** та пограничною кривою **OKB** - область вологої насиченої пари. У цій області ізобароізотерми є прямими лініями, які вιάлом розбігаються від точки **O** до верхньої пограничної кривої. Це пов'язано саме із ізобароізотермічністю процесу пароутворення.

У області перегрітої пари, що розташована над верхньою пограничною кривою **KB**, ізобари підіймаються угору із опуклістю додолу. Ізотерми у цій області підіймаються угору із опуклістю угору. При цьому по мірі відходу від верхньої пограничної кривої вони асимптотично наближаються до горизонтальних ліній, що відповідає поведженню ідеального газу, ентальпія якого визначається температурою.

На діаграму також нанесено сітку ізохор ($v=const$) - пунктирні лінії на рисунку 19. Вони підіймаються угору більш круто, ніж лінії ізобар. В області вологої насиченої пари наноситься також сітка ліній постійного ступеня сухості пари ($x=const$), які сходяться у критичній точці **K**.

Розглянемо загальні засади розрахунку процесів зміни стану пари з використанням *i-s*-діаграми стану

Спочатку за заданими даними на діаграмі будується графік процесу. У ході побудови, знаходячи ізокриві, що проходять крізь задані точки, визначаємо чисельні значення параметрів пари у початковому та кінцевому станах.

В будь-якій точці одразу ж можна прочитати значення наступних термодинамічних параметрів: питомої ентальпії *i*, питомої ентропії *s*, питомого об'єму *v*, тиску **P**, температури *t*, а в області вологої насиченої пари ще і ступеня сухості пари *x*.

Знаючи питому ентальпію, тиск та питомий об'єм, можна за загальною формулою обчислити питому внутрішню енергію у довільному стані

$$u = i - P v . \quad (1)$$

Формула (1) дозволяє визначити зміну внутрішньої енергії пари у будь-якому процесі $n \rightarrow k$:

$$\Delta u_{n \rightarrow k} = u_k - u_n = i_k - i_n - (P_k v_k - P_n v_n) ,$$

Питома робота може бути розрахована на основі першого закону термодинаміки

$$l_{n \rightarrow k} = q_{n \rightarrow k} - \Delta u_{n \rightarrow k} ,$$

де $q_{n \rightarrow k}$ - питома теплота процесу.

Теплоти процесів визначаються по відповідним формулам (див. Таблицю 1.1)

Таблиця 1.1. Зв'язок енергетичних параметрів у процесах

Процес $n \rightarrow k$	Зміна внутрішньої енергії, $\Delta u_{n \rightarrow k}$	Теплота $q_{n \rightarrow k}$	Робота $l_{n \rightarrow k}$
Ізотермічний $T=T_n=T_k=const$	$i_k - i_n - (P_k v_k - P_n v_n)$	$T (s_k - s_n)$	$q_{n \rightarrow k} - \Delta u_{n \rightarrow k}$
Ізобарний $P=P_n=P_k=const$	$i_k - i_n - P (v_k - v_n)$	$i_k - i_n$	$P (v_k - v_n)$, або $q_{n \rightarrow k} - \Delta u_{n \rightarrow k}$

Перейдемо безпосередньо до викладення методики використання i - s -діаграми водяної пари (остання є в додатках). Розрахунки будемо демонструвати на прикладі процесів, що розпочиналися із початкового стану з тиском $P_1 = 1.5 \text{ МПа} = 1500 \text{ кПа}$ і ступенем сухості $x_1 = 0.94$, в ході яких до водяної пари підводилося $q = 490 \text{ кДж/кг}$ тепла.

Порядок визначення параметрів початкового стану

Розрахунки всіх процесів починаються з визначення параметрів початкового стану системи. Для цього необхідно знайти точку на i - s -діаграмі, яка відповідає початковому стану (див., наприклад, точку **1** на Рис.1.2). В нашій задачі початкова точка **1** визначається перетином ізобари $P = P_1$ із лінією постійного ступеня сухості $x = x_1$. Порядок дії викладено далі.

1. Визначити точку, яка відповідає початковому стану на діаграмі. Для цього:

- 1.1. визначити лінію, яка є ізобарою $P = P_1$ ($P_1 = 1500 \text{ кПа}$);
- 1.2. визначити лінію постійного ступеня сухості $x = x_1$ ($x_1 = 0.94$).

Точка перетину цих двох ліній і буде точкою **1**, що відповідає початковому стану системи.

2. Визначити значення термодинамічних параметрів (які прямо нанесені на сітку діаграми) у початковому стані **1**. Для цього необхідно визначити ізолінії, які перетинають точку **1**, тобто треба:

- 2.1. для визначення питомого об'єму знайти, яка ізохора перетинає точку **1** (об'єм, що відповідає цій ізохорі, і буде давати v_1 ($v_1 = 0.13 \text{ м}^3/\text{кг}$);
- 2.2. для визначення температури знайти, яка ізотерма перетинає точку **1** (температура, що відповідає цій ізотермі, і буде давати t_1 ($t_1 = 200^\circ\text{C}$));
- 2.3. для визначення питомої ентропії знайти, яка лінія постійної ентропії (ізоентропа) перетинає точку **1** (для цього необхідно через точку **1** провести перпендикуляр до вісі ентропій; значення питомої ентропії на цьому перпендикулярі і буде давати s_1 ($s_1 = 6.20 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$));
- 2.4. для визначення питомої ентальпії знайти, яка лінія постійної ентальпії (ізоентальпа) перетинає точку **1** (для цього необхідно через точку **1** провести перпендикуляр до вісі ентальпій; значення питомої ентальпії на цьому перпендикулярі і буде давати i_1 ($i_1 = 2680 \text{ кДж/кг}$)).

3. Розрахувати значення питомої внутрішньої енергії у стані **1** (для чого скористатися загальним термодинамічним співвідношенням (1))

$$u_1 = i_1 - P_1 v_1. \quad (u_1 = 2680 - 1500 \cdot 0.13 = 2485 \text{ кДж/кг})$$

Порядок визначення параметрів ізотермічного процесу.

Графічним зображенням ізотермічного процесу є лінія **1**→**2** (див. Рис. 1.2).

Нехай кінцева точка **2** ізотермічного процесу задається кількістю наданого тепла. Тоді вона розташована на перетині ізотерми $t = t_1$ із ізоентропою $s = s_2$. Кінцеве значення питомої ентропії (s_2) розраховується із зв'язку питомої теплоти q , що надається тілу в ізотермічному процесі, із зміною ентропії -

$$q = T \cdot (s_2 - s_1) \Rightarrow s_2 = s_1 + q/T_1.$$

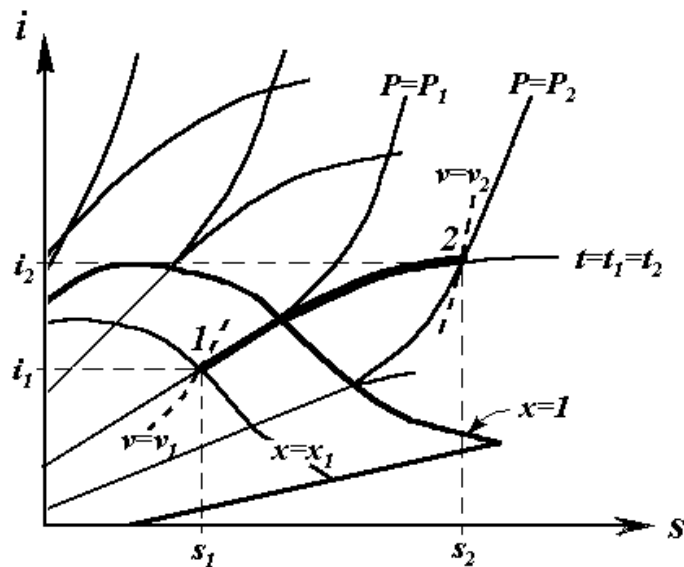


Рис. 1. . - Схематичне зображення ізотермічного процесу на i-s-діаграмі

У зв'язку з сказаним розрахунок йде по наступній схемі.

4. Визначити кінцеву точку ізотермічного процесу. Для цього:

4.4. розрахувати ентропію кінцевого стану ізотермічного процесу:

$$s_2 = s_1 + q/T_1 = s_1 + q/(t_1 + 273) ;$$

$$(s_2 = 6.20 + 490/(200 + 273) = 7.24 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}))$$

4.5. знайти лінію, яка є ізоентропою $s = s_2$ (це вертикаль, що перетинає вісь ентропій у точці s_2 ($s_2 = 7.24 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$);

4.6. знайти точку перетину ізоентропи $s = s_2$ з ізотермою $t = t_2$ ($t_2 = t_1 = 200^\circ\text{C}$); це і є кінцева точка 2.

5. Дотримуючись методики пункту 2, визначити у точці 2 значення термодинамічних параметрів, які безпосередньо нанесено на діаграму:

5.4. для визначення питомого об'єму знайти, яка ізохора перетинає точку 2 (об'єм, що відповідає цій ізохорі, і буде давати v_2 ($v_2 = 0.60 \text{ м}^3/\text{кг}$);

5.5. для визначення тиску знайти, яка ізобара перетинає точку 2 (тиск, що відповідає цій ізобарі, і буде давати P_2 ($P_2 = 370 \text{ кПа}$);

5.6. для визначення питомої ентальпії знайти, яка лінія постійної ентальпії (ізоентальпа) перетинає точку 2 (для цього необхідно через точку 2 провести перпендикуляр до вісі ентальпій; значення питомої ентальпії на цьому перпендикулярі і буде давати i_2 ($i_2 = 2865 \text{ кДж}/\text{кг}$)).

6. Розрахувати значення питомої внутрішньої енергії у стані 2 (для чого скористатися загальним термодинамічним співвідношенням (1))

$$u_2 = i_2 - P_2 v_2. (u_2 = 2865 - 370 \cdot 0.60 = 2640 \text{ кДж}/\text{кг})$$

7. Розрахувати значення енергетичних параметрів у процесі:

7.4. зміна внутрішньої енергії дорівнює

$$\Delta u_{1 \rightarrow 2} = u_2 - u_1 (\Delta u_{1 \rightarrow 2} = 2640 - 2485 = 155 \text{ кДж}/\text{кг});$$

7.2. зміна ентальпії дорівнює

$$\Delta i_{1 \rightarrow 2} = i_2 - i_1 (\Delta i_{1 \rightarrow 2} = 2865 - 2680 = 185 \text{ кДж}/\text{кг});$$

7.3. зміна ентропії дорівнює

$$\Delta s_{1 \rightarrow 2} = s_2 - s_1 \quad (\Delta s_{1 \rightarrow 2} = 7.24 - 6.20 = 1.04 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}));$$

7.4. робота поширення дорівнює

$$l_{1 \rightarrow 2} = q_{1 \rightarrow 2} - \Delta u_{1 \rightarrow 2} \quad (l_{1 \rightarrow 2} = 490 - 155 = 335 \text{ кДж}/\text{кг}).$$

Порядок визначення параметрів ізобарного процесу

Графічним зображенням ізобарного процесу є лінія $1 \rightarrow 3$ (див. Рис. 1.3).

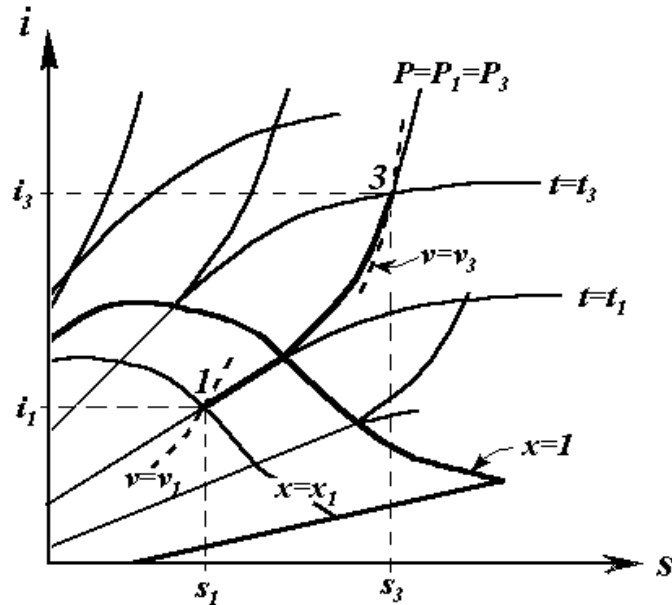


Рис. 1.3. Схематичне зображення ізобарного процесу на i - s -діаграмі.

У зв'язку з сказаним розрахунок йде по наступній схемі.

8. Визначити кінцеву точку ізобарного процесу. Для цього:

8.4. розрахувати ентальпію кінцевого стану ізобарного процесу

$$i_3 = i_1 + q \quad (i_3 = 2680 + 490 = 3170 \text{ кДж}/\text{кг});$$

8.5. знайти лінію, яка є ізоентальпою $i = i_3$ (це горизонталь, що перетинає вісь ентальпії у точці i_3 ($i_3 = 3170 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$);

8.6. знайти точку перетину ізоентальпи $i = i_3$ з ізобарою $P = P_3$ ($P_3 = P_1 = 1500 \text{ кПа}$); це і є кінцева точка 3.

9. Дотримуючись методики пункту 2, визначити у точці 3 значення термодинамічних параметрів, які безпосередньо нанесено на діаграму:

9.4. для визначення питомого об'єму знайти, яка ізохора перетинає точку 3 (об'єм, що відповідає цій ізохорі, і буде давати v_3 ($v_3 = 0.20 \text{ м}^3/\text{кг}$);

9.5. для визначення температури знайти, яка ізотерма перетинає точку 3 (температура, що відповідає цій ізотермі, і буде давати t_3 ($t_3 = 360 \text{ }^\circ\text{C}$));

9.6. для визначення питомої ентропії знайти, яка лінія постійної ентропії (ізоентропа) перетинає точку 3 (для цього необхідно через точку 3 провести перпендикуляр до вісі ентропії; значення питомої ентропії на цьому перпендикулярі і буде давати s_3 ($s_3 = 7.15 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$));

10. Розрахувати значення питомої внутрішньої енергії у стані 3 (для чого скористатися загальним термодинамічним співвідношенням (1))

$$u_3 = i_3 - P_3 v_3. \quad (u_3 = 3170 - 1500 \cdot 0.20 = 2870 \text{ кДж}/\text{кг})$$

11. Розрахувати значення енергетичних параметрів у процесі:

11.1. зміна внутрішньої енергії дорівнює:

$$\Delta u_{1 \rightarrow 3} = u_3 - u_1 \quad (\Delta u_{1 \rightarrow 3} = 2870 - 2485 = 385 \text{ кДж/кг});$$

11.2. зміна ентальпії дорівнює

$$\Delta i_{1 \rightarrow 3} = i_3 - i_1 = q \quad (\Delta i_{1 \rightarrow 3} = 3170 - 2680 = 490 \text{ кДж/кг});$$

11.3. зміна ентропії дорівнює

$$\Delta s_{1 \rightarrow 3} = s_3 - s_1 \quad (\Delta s_{1 \rightarrow 3} = 7.15 - 6.20 = 0.95 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)});$$

11.4. робота розширення дорівнює

$$l_{1 \rightarrow 3} = q_{1 \rightarrow 3} - \Delta u_{1 \rightarrow 3} \quad (l_{1 \rightarrow 3} = 490 - 385 = 105 \text{ кДж/кг}),$$

що у даному випадку повинно збігатися з

$$l_{1 \rightarrow 3} = P_1 (v_3 - v_1) \quad (l_{1 \rightarrow 3} = 1500 \cdot (0.20 - 0.13) = 105 \text{ кДж/кг}).$$

РОЗРАХУНКОВА РОБОТА №2

Задача. Проектування мереж теплообміну хіміко-технологічних систем.

Для заданих теплових потоків (див. Таблиця 2.1):

- 1) побудувати складені криві;
- 2) визначити точку пінча;
- 3) побудувати сіткову діаграму потоків процесу при заданому рівні мінімальної різниці температур між гарячими та холодними потоками Δt_{min} ;
- 4) використовуючи сіткову діаграму, розробити мережу теплообмінників, що забезпечує максимальну рекуперацію енергії;
- 5) визначити загальну потужність рекуперації $Q_{рек}$ та теплові потужності, які необхідні для нагрівання Q_H та охолодження Q_C потоків з використанням допоміжних енергоносіїв при заданому рівні мінімальної різниці температур між гарячими та холодними потоками Δt_{min} .

Таблиця 2.1. Характеристики теплових потоків

Варіант 1	Вид потоку	Початкова температура $t_n, ^\circ\text{C}$	Кінцева температура $t_k, ^\circ\text{C}$	Потокова теплоємність $W, \text{кВт/К}$
№ потоку				
1	гарячий	180	80	1,0
2	гарячий	130	40	2,0
3	холодний	60	100	4,0
4	холодний	30	120	1,8
$\Delta t_{min} = 10^\circ\text{C}$				

Таблиця 2.1 (продовження). Характеристики теплових потоків

Варіант 2	Вид потоку	Початкова температура $t_n, ^\circ\text{C}$	Кінцева температура $t_k, ^\circ\text{C}$	Потокова теплоємність $W, \text{кВт/К}$
№ потоку				
1	гарячий	320	200	1,8
2	гарячий	480	290	2,0
3	холодний	240	500	1,0
4	холодний	140	320	1,5
$\Delta t_{min} = 20^\circ\text{C}$				

Основні теоретичні положення проектування мереж теплообміну хіміко-технологічних систем.

Результатом виконання початкових етапів проектування хіміко-технологічних систем (ХТС) є визначення їх матеріального і енергетичного балансів. Це означає, що стають відомими матеріальні і пов'язані з ними енергетичні потоки. Ця інформація є початковими даними для проектування теплообмінної системи і системи енергоносіїв. Для раціонального виконання цих етапів використовується пінч-аналіз.

1. Визначення точки пінча

1.1. Складені криві технологічних потоків

Спочатку всі технологічні потоки ХТС поділяють на дві групи. До одної із них входять потоки, які вимагають охолодження перед подальшим використанням. Ці

потоки мають назву – **гарячі потоки**. Другу групу складають потоки, які необхідно підігрівати – **холодні потоки**.

Зміну ентальпій технологічних потоків зручно аналізувати, використовуючи температурно-ентальпійні ($t-I$) діаграми (Рис. 1). Гарячі потоки позначають векторами спрямованими справа наліво (Рис. 1а). Це відображає зменшення ентальпії (тепловмісту), як при охолодженні, так і при конденсації. Аналогічно холодні потоки позначають векторами, спрямованими зліва направо, що відповідає збільшенню ентальпії при нагріванні або википанні (Рис. 1б).

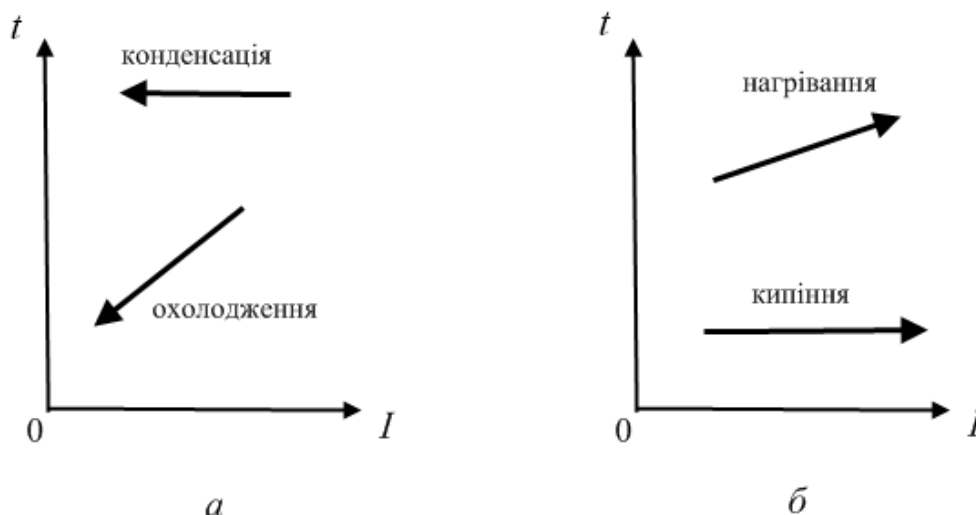


Рис. 1. Представлення технологічних потоків на температурно-ентальпійній площині: а – гарячі потоки; б – холодні потоки

Абсолютна величина зміни ентальпії технологічного потоку за одиницю часу в процесах нагрівання або охолодження в межах температур $[t_1, t_2]$ може бути розрахована згідно виразу:

$$\Delta I = \int_{t_1}^{t_2} c_p \cdot G \, dt = \bar{c}_p \cdot G \cdot (t_2 - t_1), \text{ кВт}, \quad (1)$$

де c_p і $\bar{c}_p$ – питома масова ізобарна теплоємність теплоносія і її середнє значення, відповідно, в інтервалі температур $[t_1, t_2]$, кДж/(кг·К); G – масова витрата потоку, кг/с.

Якщо ввести **потоківу теплоємність**:

$$W \equiv \bar{c}_p \cdot G, \text{ кВт/К}, \quad (2)$$

то співвідношення (1) набуває вигляду:

$$\Delta I = W \cdot (t_2 - t_1), \text{ кВт}. \quad (3)$$

1.2 Побудова складених кривих двох технологічних потоків

Розглянемо систему з двох теплових потоків, ентальпійна діаграма яких зображена на Рис.2. Потік 1 (з потоковою теплоємністю $W_1 = 3$ кВт/К) вимагає охолодження від 120°C до 80°C , для чого від нього згідно з формулою (3) треба щосекунди відводити енергію $\Delta I_1 = W_1 \cdot \Delta t_1 = 3 \cdot (120 - 80) = 120$ кВт. Потік 2 ($W_2 = 4$ кВт/К) необхідно нагрівати від 70°C до 100°C , що згідно з формулою (3) вимагає щосекундного

підводу енергії $\Delta I_2 = W_2 \cdot \Delta t_2 = 4 \cdot (100 - 70) = 120$ кВт. Різниця між кінцевою температурою потоку **1** (80°C) і початковою температурою потоку **2** (70°C) складає 10°C .

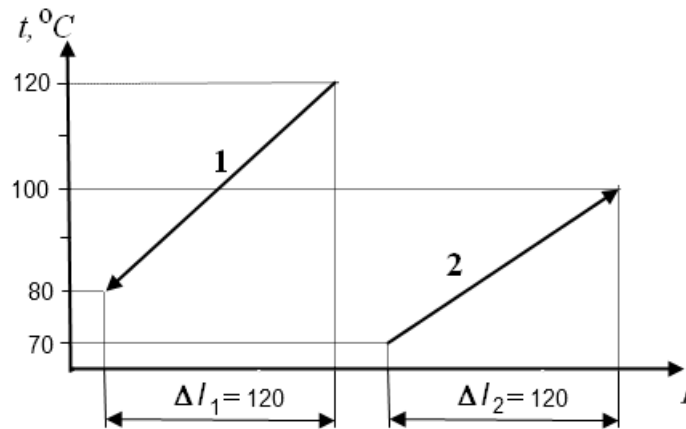


Рис. 2. – Ентальпійна діаграма потоків **1** і **2**.

Якщо зв'язати потоки **1** і **2** протипливним теплообмінником, який реалізує саме цю мінімальну різницю температур потоків в 10°C , то вся надлишкова енергія потоку **1** буде передаватися потоку **2** (Рис. 3а, 3б). Графічно такому випадку відповідає ситуація, коли відрізки прямих, що відповідають тепловим потокам на ентальпійній діаграмі, розташовані так, що їх проекції на вісь I повністю перекривають одне одного.

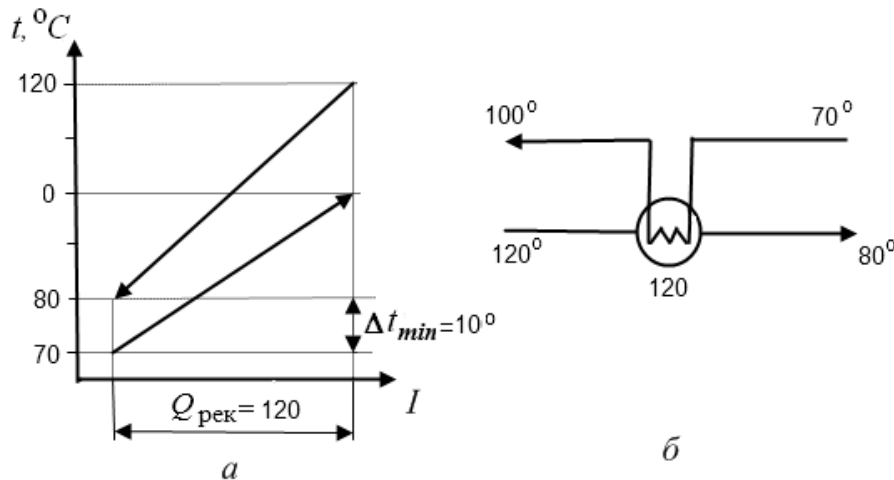


Рис. 3. Повна рекуперація енергії між двома потоками

Якщо вибрати теплообмінник таким чином, щоб мінімальна температурна різниця між ними складала 20°C , то тепловий потік між потоками **1** та **2** зменшиться до 90 кВт. Дивись Рисунок 4.

Даний результат можна отримати аналітично, використовуючи формули (А9) – (А12) додатку А у яких $W_1 = 3$ кВт, $W_2 = 4$ кВт, $\Delta t_{min} = \Delta t'' = 20^\circ\text{C}$, і тому

$$\Delta t' = \frac{W_1}{W_2} \cdot \Delta t'' + \frac{W_2 - W_1}{W_2} \cdot (t'_1 - t'_2) = \frac{3}{4} \cdot 20 + \frac{4 - 3}{4} \cdot (120 - 70) = 27,5^\circ\text{C},$$

$$t''_1 = t'_2 + \Delta t'' = 70 + 20 = 90^\circ\text{C},$$

$$t_2'' = t_1' - \Delta t' = 120 - 27,5 = 92,5^\circ \text{C},$$

$$Q_{\text{рек}} = W_1 \cdot (t_1' - t_2' - \Delta t'') = 3 \cdot (120 - 70 - 20) = 90 \text{ кВт}.$$

У даній ситуації виникає необхідність охолодження потоку **1** на $Q_C = 30$ кВт за допомогою зовнішнього холодоагенту та нагрів потоку **2** на $Q_H = 30$ кВт за допомогою зовнішнього джерела тепла (Рис. 4 а, б).

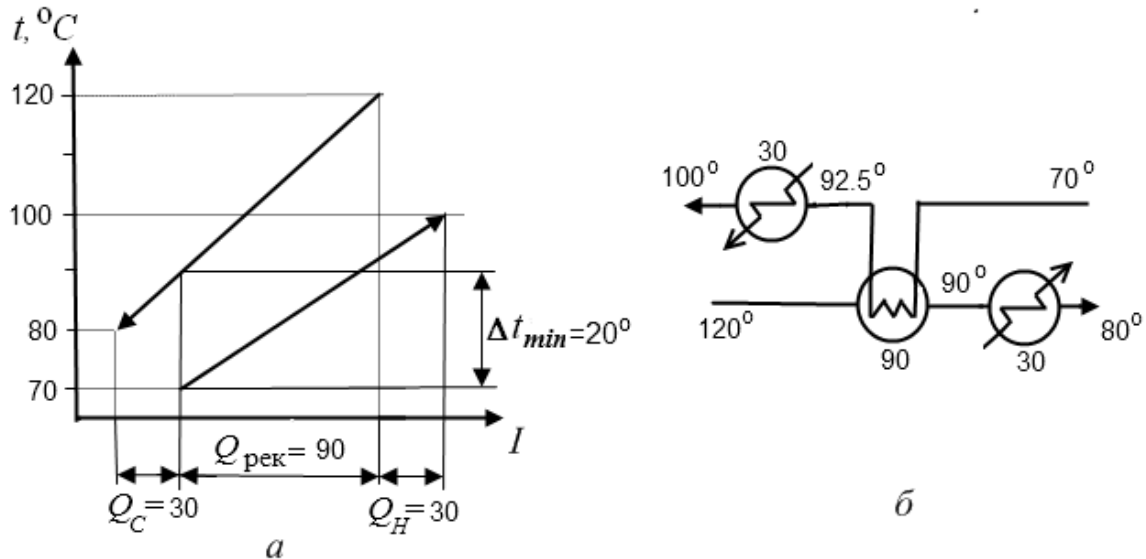


Рис. 4. Часткова рекуперація енергії між двома потоками

На Рис. 4 а мінімальній різниці температур між потоками **1** та **2** відповідає мінімальна відстань між відрізками по вісі температур t , а енергії рекуперації відповідає ділянка, загальна для проекцій відрізків **1** та **2** на вісь I .

Із розглянутого витікає, що збільшуючи мінімальну температурну відстань теплоносіїв у теплообміннику, ми зменшуємо площу теплообміну тобто капітальні витрати, але збільшуємо витрати на додаткову енергію.

1.3 Побудова складених кривих багатьох технологічних потоків

Розглянемо ситуацію, у якій існують чотири теплових потоки ХТС, і дані про них наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики теплових потоків

№	Вид потоку	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}/^\circ\text{C}$	$\Delta I = W \cdot t_k - t_n , \text{кВт}$
1	холодний	40	155	2,0	$2 \cdot (155 - 40) = 230$
2	гарячий	190	80	3,0	$3 \cdot (190 - 80) = 330$
3	холодний	100	160	4,0	$4 \cdot (160 - 100) = 240$
4	гарячий	170	50	1,5	$1,5 \cdot (170 - 50) = 180$

На Рис. 5 представлена ентальпійна діаграма цих потоків. Для побудови «гарячої» складеної лінії потоків упорядкуємо початкові і кінцеві температури гарячих потоків (у нашому випадку **2, 4**) за зростанням і розіб'ємо на інтервали температур: (50, 80), (80, 170), (170, 190). Далі визначимо: 1) величини температурних інтервалів $\Delta t_{H,i} = |t_{i,l} - t_{i,r}|$, де $t_{i,l}$ і $t_{i,r}$ - ліва і права границі i -го інтервалу; 2) сумарну теплоєм-

ність гарячих потоків на інтервалі $W_{H,i}$; 3) зміну ентальпії складеного потоку на інтервалі $\Delta I_{H,i} = W_{H,i} \cdot \Delta t_{H,i}$. Результати відповідних дій показані в Таблиці 2.

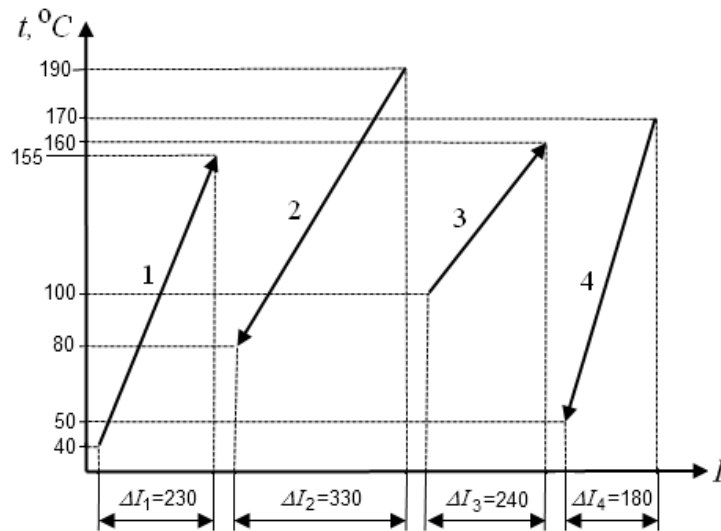


Рис. 5. Ентальпійна діаграма теплових потоків

Аналогічно обробляються результати для побудови «холодної» складової лінії потоків, яка об'єднує холодні потоки (1 і 3). Результати відповідних дій показані в Таблиці 3.

Таблиця 2. Розрахунок параметрів складеного гарячого потоку

i	1	2	3
$(t_{i,l}, t_{i,r})$	(50,80)	(80,170)	(170,190)
$\Delta t_{H,i} = t_{i,l} - t_{i,r} $	$80 - 50 = 30$	$170 - 80 = 90$	$190 - 170 = 20$
$W_{H,i}$	$W_4 = 1,5$	$W_2 + W_4 = 3 + 1,5 = 4,5$	$W_2 = 3$
$\Delta I_{H,i} = W_{H,i} \cdot \Delta t_{H,i}$	$1,5 \cdot 30 = 45$	$4,5 \cdot 90 = 405$	$3 \cdot 20 = 60$

Таблиця 3. Розрахунок параметрів складеного холодного потоку

i	1	2	3
$(t_{i,l}, t_{i,r})$	(40,100)	(100,155)	(155,160)
$\Delta t_{C,i} = t_{i,l} - t_{i,r} $	$100 - 40 = 60$	$155 - 100 = 55$	$160 - 155 = 5$
$W_{C,i}$	$W_1 = 2$	$W_1 + W_3 = 2 + 4 = 6$	$W_3 = 4$
$\Delta I_{C,i} = W_{C,i} \cdot \Delta t_{C,i}$	$2 \cdot 60 = 120$	$6 \cdot 55 = 330$	$4 \cdot 5 = 20$

Базуючись на цих розрахунках, можна зобразити «гарячу» і «холодну» складові лінії на t - I - діаграмі (Рис. 6).

1.4 Точка «пінча»

При проектуванні мережі теплообмінників можна задатися величиною $\Delta t_{\min}$, а далі вимагати, щоби мінімальна температурна різниця кожного теплообмінника ме-

режі не перевищувала $\Delta t_{\min}$. Для приклада задамося величиною $\Delta t_{\min} = 10^\circ\text{C}$ і розмістимо «гарячу» і «холодну» складені лінії таким чином, щоб мінімальна відстань між ними уздовж вісі температур дорівнювала 10°C (Рис. 7).

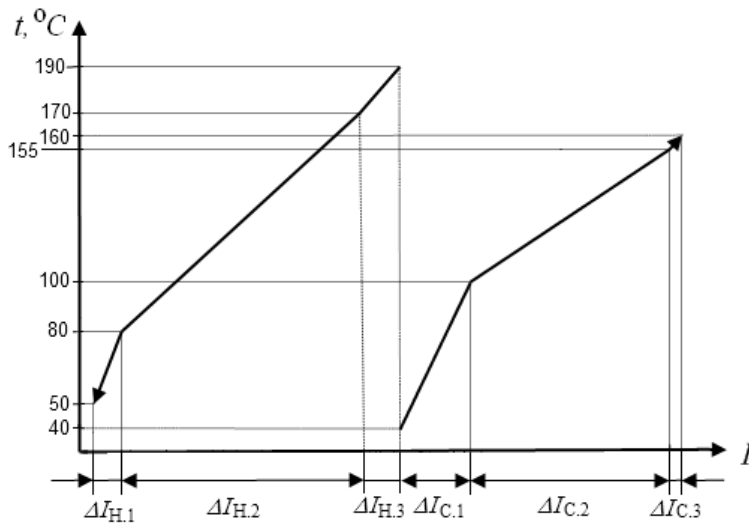


Рис. 6. Складові лінії теплових потоків

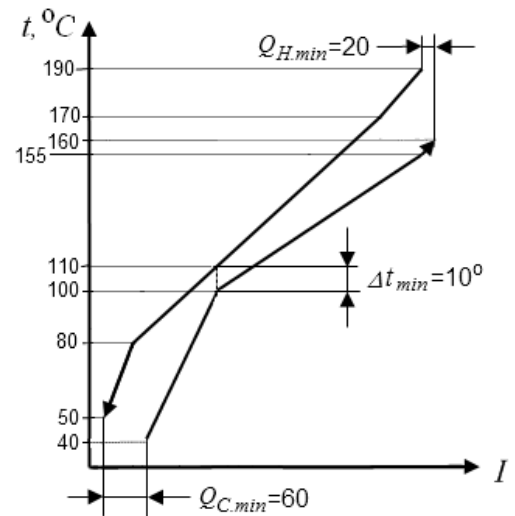
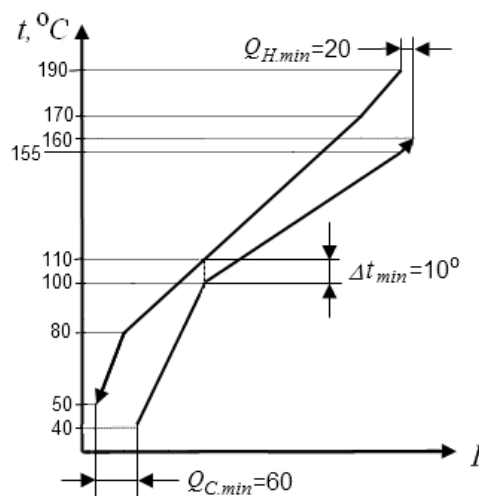


Рис. 7. Зсув складових ліній у випадку $\Delta t_{\min} = 10^\circ\text{C}$

У цьому випадку відстань між складовими кривими на «гарячому» та «холодному» кінцях дорівнюють мінімальній кількості енергії, яка необхідна для нагріву ($Q_{H,\min} = 20$ кВт) та охолодження ($Q_{C,\min} = 60$ кВт) системи. Область, у якій відстань між складовими кривими дорівнює $\Delta t_{\min}$, називається «точка пінча». На «гарячій» складовій кривій цій «точці» відповідає температура 110°C , на «холодній» складовій кривій ця температура становить 100°C .

Вибір значення $\Delta t_{\min}$ базується на компромісі між капітальними затратами, які зростають з ростом площі поверхні теплопередачі F у теплообміннику (див. додаток А) і з затратами на додаткову енергію ($Q_{H,\min}$ і $Q_{C,\min}$). І цей вибір є задачею оптимізації з обмеженнями.



2. Проектування мережі теплообмінників із максимальною рекуперацією енергії

2.1 Сіткова діаграма потоків ХТС

Для заданого значення $\Delta t_{\min}$ можна побудувати сіткову діаграму потоків, використання якої допомагає побудові мережі теплообмінників. Для випадку потоків з Таблиці 1 при $\Delta t_{\min} = 10^\circ\text{C}$ сіткова діаграма представлена на Рис. 8.

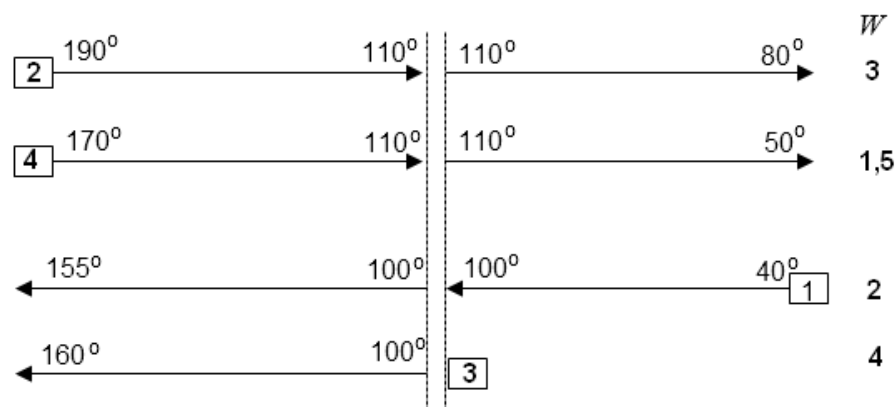


Рис. 8. Сіткова діаграма потоків

Сформулюємо правила проектування мережі теплообмінників, що забезпечує максимальну енергію рекуперації при заданому значенні $\Delta t_{\min}$:

1. Розбити початкову систему потоків на дві підсистеми – потоки вище точки пінча і потоки нижче точки пінча.

2. Проводити розміщення теплообмінників в підсистемах незалежно одне від одного, рухаючись від точки пінча.

3. Починати з потоків, що входять у область пінча і мають максимальне значення потокової теплоємності.

4. В області пінча при установці зв'язку дотримуватися правила $W_{\text{вихідних потоків}} \geq W_{\text{вхідних потоків}}$.

5. Зробити максимальним навантаження теплообмінника, що пов'язує кожну пару потоків.

6. Визначити кількість енергії допоміжного енергоносія, коли усі можливості рекуперації вичерпані.

2.2 Проектування мережі теплообмінників із максимальною рекуперацією енергії за заданого значення мінімального температурного напору

Розглянемо Рис. 9 а. На ньому зображена система, яку складають потоки вище пінча. Тут є два вхідних і два вихідних потоки. Вхідними є потоки 2 і 4. Через те, що $W_2 > W_4$, (згідно з правилом 3) вибираємо потік 2. Його ми (згідно з правилом 4) з'єднаємо з потоком 3, бо із потоків, що виходять із пінча (1 і 3), тільки у нього $W_3 > W_2$. Визначимо теплове навантаження теплообмінника 2-3. Потік 3 може прийняти $\Delta I_3 = 240$ кВт, а потік 2 може віддати $\Delta I_2 = 240$ кВт, через що їх (згідно з правилом 5) треба об'єднувати теплообмінником на 240 кВт. Такий теплообмінник вичерпує енергію обох потоків, і це відмічається галочками на лініях обох потоків (Рис. 9 б).

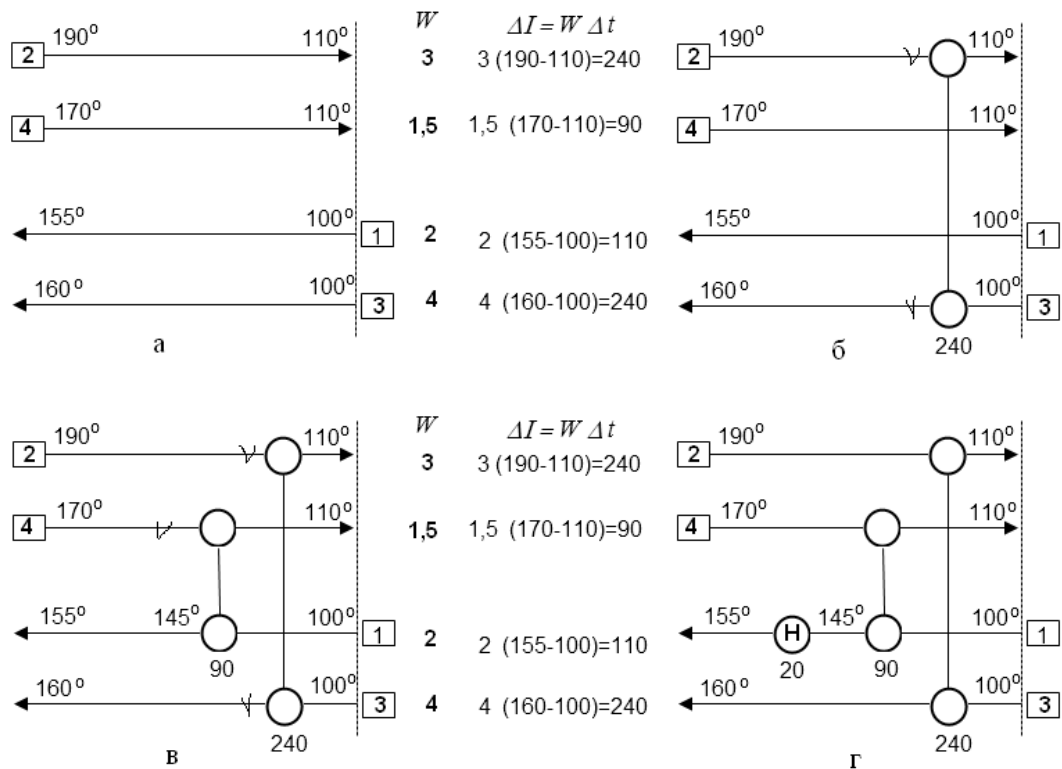


Рис. 9. Установка теплообмінників у області вище пінча

У ситуації, що виникла, єдина можливість зв'язку – зв'язок потоків **4** і **1**. Потік **1** може віддати 110 кВт енергії, потік **4** може прийняти лише 90 кВт, через що (згідно з правилом 5) потужність теплообмінника 4-1 становитиме 90 кВт (рисунк 9 в). Такий теплообмінник вичерпає потік **4**, через що помітимо його. Температура холодного теплоносія потоку **1** після теплообмінника становитиме

$$t_1'' = t_1' + \frac{\Delta I_{4-1}}{W_1} = 100 + \frac{90}{2} = 145^\circ \text{C}.$$

Залишається підвести до потоку **1** тепла у кількості 20 кВт від допоміжного джерела енергії (Рис. 9 г).

На Рис. 10 а показано підсистема потоків нижче пінча. Вона має лише один вхідний потік – потік **1**. Цей потік (згідно з правилом 4) треба зв'язувати теплообмінником з потоком 2, бо $W_2 > W_1$, а $W_4 < W_1$. Потік **1** може прийняти 120 кДж, а потік **2** – віддати лише 90 кДж. Через позначену обставину теплове навантаження теплообмінника 2-1 (згідно з правилом 5) становитиме 90 кВт. Вичерпаний потік **2** помітимо галочкою (Рис. 10 б). Температура холодного теплоносія потоку **1** на вході до теплообмінника 2-1 становитиме $t_1' = t_1'' - \frac{\Delta I_{2-1}}{W_1} = 100 - \frac{90}{2} = 55^\circ \text{C}.$

Для того, щоб до кінця задовольнити потреби потоку **1** в енергії 30 кВт=(120-90) кВт, з'єднаємо його із потоком **4** (Рис. 10 в). Через те, що ми відійшли від області пінча, дотримання правила 4 є зайвим. Потужність потоку 4 складає 90 кВт, через що, згідно з правилом 5, теплове навантаження теплообмінника 4-1 становитиме 30

кВт. Помітимо вичерпаний потік **1**. Температура потоку **4** на виході із теплообмінника 4-1 становитиме $t_4'' = t_4' - \frac{\Delta I_{4-1}}{W_4} = 110 - \frac{30}{1.5} = 90^\circ \text{C}$.

Потік тепла, який ще треба відвести від потоку **4**, становить $90-30= 60$ кВт (Рис. 10 г).

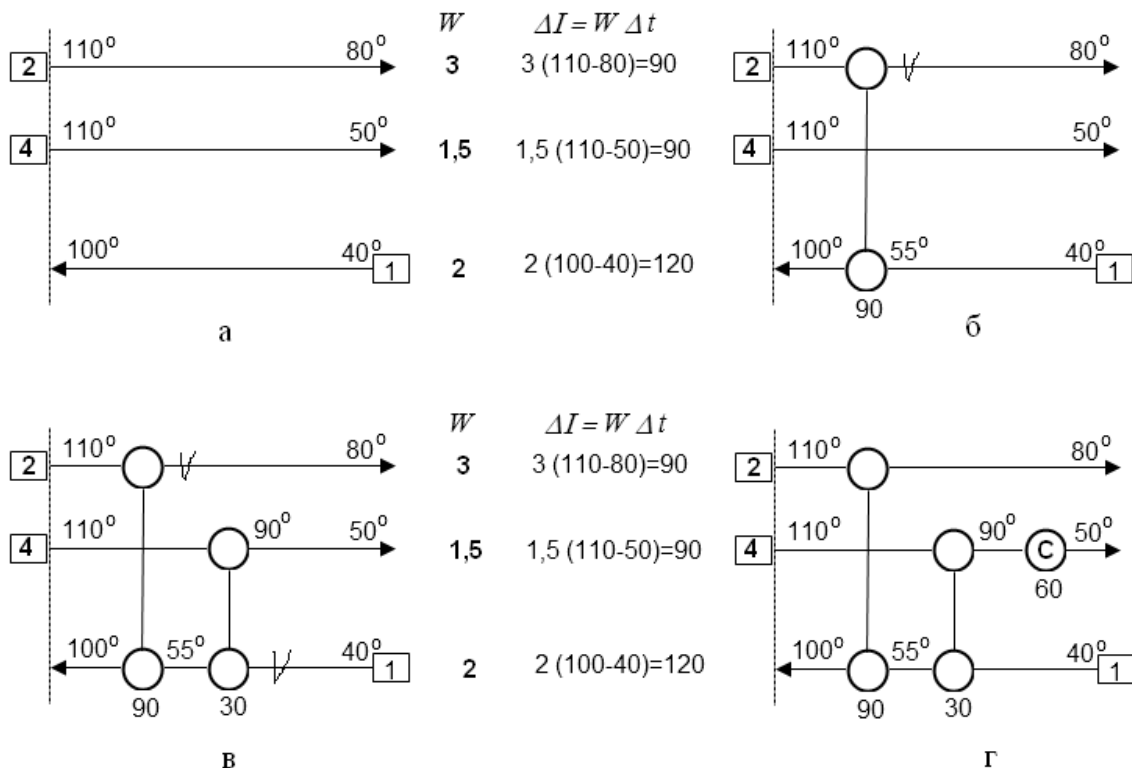


Рис. 10. Установка теплообмінників у області нижче пінча

Отриманий підсумковий проект мережі теплообмінників зображено на Рис. 11. Він задовольняє вимозі максимуму рекуперації енергії, що підтверджується тим, що кількість додаткової енергії, необхідної для нагріву (20 кВт) і охолодження (60 кВт) системи, співпадає із результатом, отриманим при зсуві складених ліній (Рис.7). Обсяг енергії рекуперації дорівнює сумарній потужності теплообмінників і складає $90+240+90+30=450$ кВт.

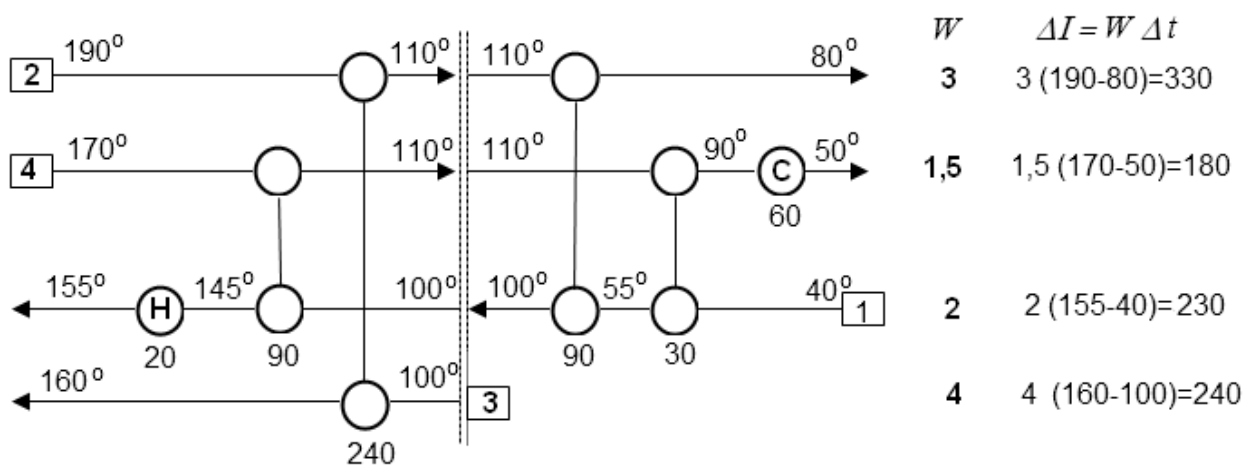


Рис. 11. Кінцевий проект

ДОДАТОК А

Основні результати перевірного розрахунку

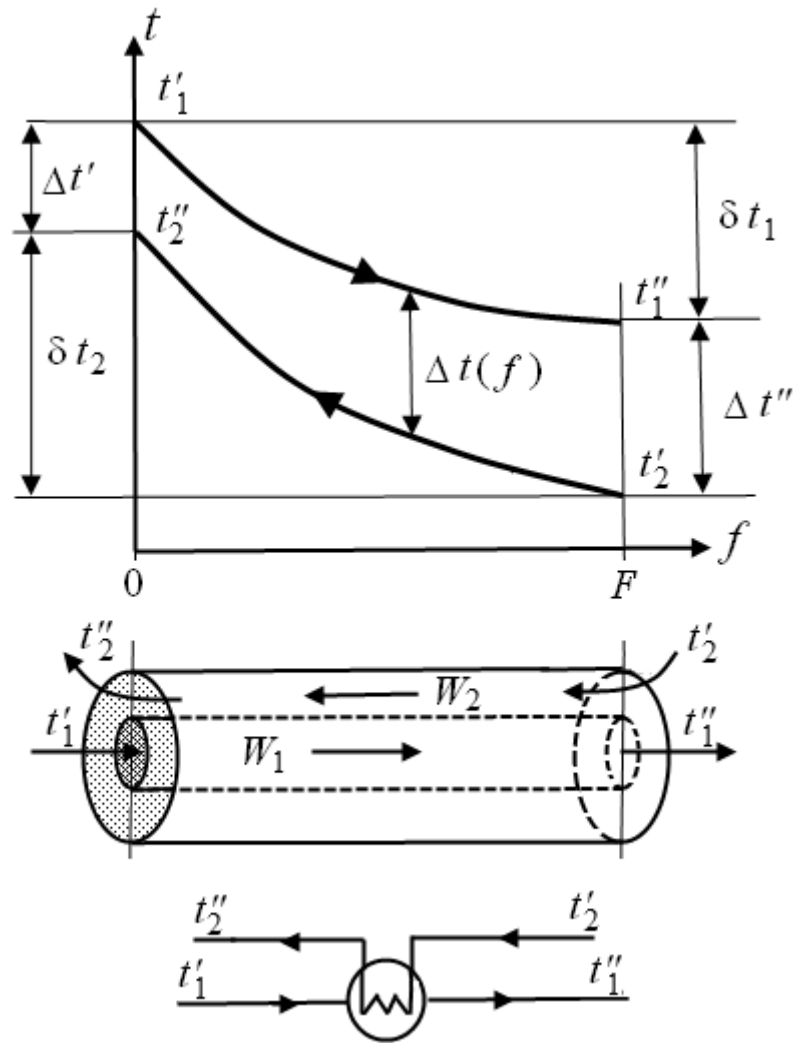


Рис. А1. Розподіл температур теплоносіїв вздовж поверхні теплообміну теплообмінного апарату при протипливі; схема потоків у апараті труба у трубі; схематичне зображення теплообмінного апарата.

Основні елементи опису теплообмінного апарату зображені на Рис. А1. Нижні індекси $i=1$ та $i=2$ відносяться до гарячого і холодного теплоносіїв, відповідно. Позначки t'_i і t''_i означають температуру i -го теплоносія відповідно на вході та виході з апарату. $\Delta t \equiv t_1 - t_2$ - місцеве температурне навантаження, яке на вході і виході теплоносіїв з апарату приймає значення відповідно $\Delta t' \equiv t'_1 - t''_2$ і $\Delta t'' \equiv t''_1 - t'_2$ (для визначеності прийнято визначати вхід і вихід за напрямом руху гарячого теплоносія). $\delta t_i \equiv |t'_i - t''_i|$ ($\delta t_1 \equiv t'_1 - t''_1$ і $\delta t_2 \equiv t''_2 - t'_2$) - абсолютна величина зміни температури i -го теплоносія при проходженні крізь теплообмінний апарат. W_i - потокова теплоємність i -го теплоносія, кВт/К, яка дорівнює $W_i \equiv c_{p,i} \cdot G_i$, де $c_{p,i}$ і G_i - відповідно, питома масова ізобарна теплоємність і масова витрата i -го теплоносія. f і F , відповідно, поточна і повна площа поверхні теплообміну, м^2 .

Стандартний варіант перевірного теплового розрахунку розглядає ситуацію, коли задані вхідні температури теплоносіїв t'_1 і t'_2 , їх потокові теплоємності W_1 і W_2 та добуток $(F \cdot K)$ повної площі поверхні теплопередачі F на середній коефіцієнт теплопередачі K . Визначаються вихідні температури теплоносіїв t''_1 і t''_2 і енергія Q , яка щосекунди передається в апараті від гарячого до холодного теплоносія.

Порядок розрахунку наступний

1) Визначається зміна температури гарячого теплоносія:

$$\delta t_1 = (t'_1 - t'_2) \cdot \frac{1 - e^{-K \cdot F \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)}}{1 - \frac{W_1}{W_2} \cdot e^{-K \cdot F \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}\right)}}. \quad (A1)$$

2) Розраховується вихідна температура гарячого теплоносія:

$$t''_1 = t'_1 - \delta t_1 \quad (A2)$$

3) Визначається зміна температури холодного теплоносія:

$$\delta t_2 = \delta t_1 \cdot \frac{W_1}{W_2}. \quad (A3)$$

4) Розраховується вихідна температура холодного теплоносія:

$$t''_2 = t'_2 + \delta t_2. \quad (A4)$$

5) Визначається переданий тепловий потік:

$$Q = W_1 \cdot \delta t_1, \text{ або } Q = W_2 \cdot \delta t_2. \quad (A5)$$

На основі наведених вище формул нескладно побачити, що температурні навантаження на вході та виході з апарату дорівнюють:

$$\Delta t' \equiv t'_1 - t''_2 = t'_1 - t'_2 - \delta t_2 = t'_1 - t'_2 - \delta t_1 \cdot \frac{W_1}{W_2} \quad (A6)$$

та

$$\Delta t'' \equiv t''_1 - t'_2 = t'_1 - t'_2 - \delta t_1. \quad (A7)$$

Порівняння співвідношень (A6), (A7) дозволяє стверджувати, що мінімальне із значень температурних навантажень $\Delta t'$ або $\Delta t''$ залежить від співвідношень потокових теплоємностей:

$$\begin{aligned} W_1 > W_2 &\Rightarrow \Delta t' < \Delta t'' \Rightarrow \min(\Delta t) = \Delta t', \\ W_1 < W_2 &\Rightarrow \Delta t' > \Delta t'' \Rightarrow \min(\Delta t) = \Delta t''. \end{aligned} \quad (A8)$$

Відмітимо, що якщо замість добутку $(F \cdot K)$ задане температурне навантаження на одному з боків теплообмінного апарату ($\Delta t'$ або $\Delta t''$), наприклад $\Delta t'$, то реалізується наступний порядок проведення перевірного розрахунку:

1) Розраховується температурне навантаження на протилежному боці апарату:

$$\Delta t'' = \frac{W_2}{W_1} \cdot \Delta t' + \frac{W_1 - W_2}{W_1} \cdot (t'_1 - t'_2). \quad (A9)$$

2) Розраховується вихідна температура гарячого теплоносія:

$$t_1'' = t_2' + \Delta t'' . \quad (\text{A10})$$

3) Розраховується вихідна температура холодного теплоносія:

$$t_2'' = t_1' - \Delta t' . \quad (\text{A11})$$

4) Визначається переданий тепловий потік

$$Q = W_1 \cdot (t_1' - t_2' - \Delta t'') , \text{ або } Q = W_2 \cdot (t_1' - t_2' - \Delta t') . \quad (\text{A12})$$

Спираючись на співвідношення (A1), неважко отримати зв'язок температурного навантаження (наприклад $\Delta t''$) із площею поверхні теплообміну F теплообмінного апарату:

$$\Delta t'' \equiv t_1'' - t_2' = t_1' - t_2' - \delta t_1 = (t_1' - t_2') \cdot \frac{1 - \frac{W_1}{W_2}}{e^{K \cdot F \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2} \right)} - \frac{W_1}{W_2}} , \quad (\text{A13})$$

або (обернувши залежність (A13))

$$F = \frac{1}{K \cdot \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2} \right)} \ln \left[\frac{W_1}{W_2} + \left(1 - \frac{W_1}{W_2} \right) \cdot \frac{t_1' - t_2'}{\Delta t''} \right] . \quad (\text{A14})$$

Зі співвідношення (A13) (або (A14)) витікає, що збільшуючи площу F можна зменшити значення мінімального (при $W_1 < W_2$) температурного навантаження $\Delta t''$ до практично нульового рівня. У цьому випадку у відповідності до співвідношення (A9) максимальне температурне навантаження $\Delta t'$ становитиме

$$\Delta t' = \frac{W_2 - W_1}{W_2} \cdot (t_1' - t_2') .$$