

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

**Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт

Київ – 2012

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

**Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності 7.05020202
«Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»**

**Київ
НТУУ «КПІ»
2012**

Математичне моделювання систем та процесів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 7.05020202 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» / Уклад.: Примиська С.О., Безносик Ю.О., – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 61с.

*Гриф надано Вченою радою ХТФ НТУУ «КПІ»
(Протокол № __ від _____ 2012)*

**Навчальне електронне видання
Математичне моделювання систем та процесів**

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності
«Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»

Укладачі Примиська Світлана Олексійовна, канд. техн. наук
 Безносик Юрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний
Редактор Т.В.Бойко, канд. техн. наук, доцент кафедри КХТП

Рецензент
Н.М. Толстопалова, канд. техн. наук, доцент кафедри ТНР та ЗХТ

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Вступ | 4 |
| Лабораторна робота 1. Ексергетичний аналіз складних хіміко-технологічних систем | 5 |
| Лабораторна робота 2. Синтез оптимальної структури системи теплообміну графоаналітичним методом | 11 |
| Лабораторна робота 3. Синтез оптимальної структури системи теплообміну за евристичними правилами | 21 |
| Лабораторна робота 4. Синтез оптимальної структури системи теплообміну на основі теорії нечітких множин | 31 |
| Лабораторна робота 5. Синтез оптимальної структури системи теплообміну на основі теорії пінч – аналізу | 44 |
| Лабораторна робота 6. Синтез оптимальної структури системи адсорбційної очистки газових викидів | 52 |
| Список рекомендованої літератури | 60 |

ВСТУП

Енергозбереження – це актуальна проблема сучасності, яка стала глобальною в світі, оскільки пов'язана із проблемою забруднення довкілля та виснаження запасів природних енергоресурсів.

У всіх сферах діяльності людини впроваджуються заходи енергозберігаючої політики. Хімічна технологія не є винятком в цьому сенсі. Проблема енергозбереження актуальна для хіміко-технологічних систем (ХТС), оскільки вони мають велику кількість джерел та стоків енергії.

Синтез оптимальної структури систем теплообміну, які застосовуються практично в будь-якому хімічному виробництві, є ключовою задачею з позицій енергозбереження. Тому студенти повинні знати сучасні методи синтезу оптимальних систем теплообміну й вміти їх застосовувати при рішенні практичних задач. Саме з метою здобуття цих знань та навичок сформовані лабораторні роботи з курсу «Математичне моделювання систем та процесів».

Послідовність лабораторних робіт відповідає викладанню теоретичного матеріалу на лекціях та матеріалу, що має бути засвоєний самостійно згідно з програмою курсу. Для кожної роботи надана необхідна інформація для виконання поставлених завдань. В кінці кожної лабораторної роботи надано низку контрольних запитань для самоперевірки засвоєння знань. Виконання кожної лабораторної роботи передбачає використання мов програмування високого рівня або сучасних програмних середовищ за вибором студента. В процесі захисту студент має не тільки продемонструвати отримані знання та навички, але й оцінити якість отриманих результатів розрахунків та ефективність використаного програмного середовища, в якому ці розрахунки були виконано.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Мета роботи – виробити у студентів уміння визначати термодинамічну ефективність для різних видів технологічних систем.

1.1. Основні теоретичні положення

Застосування ексергетичного підходу найбільш ефективне при аналізі хіміко-технологічних систем (ХТС), що мають велику кількість джерел та стоків енергії. Термодинамічну ефективність системи визначають як відношення кількості ексергії відведених із системи цільових продуктів до ексергії витраченої сировини та енергії:

$$\eta_c = \frac{\sum E_{\text{вих}}}{\sum E_{\text{вх}}}$$

Рівняння ексергетичного балансу для ХТС:

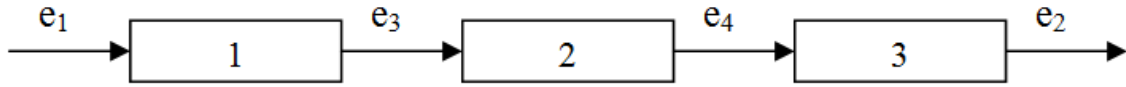
$$\sum_{i=1}^N E_{\text{вх}i} = \sum_{j=1}^M E_{\text{вих}j} + \sum_{k=1}^L D_k$$

Для дослідження термодинамічної досконалості ХТС слід встановити зв'язок загального показника якості системи η_c із характеристиками її окремих елементів. Ефективність окремого елементу ХТС оцінюється з допомогою коефіцієнту ексергетичних втрат η_E і коефіцієнту інтенсивності η_N .

Вигляд функціонального зв'язку буде різнитися в залежності від структури системи. Найпростішим варіантом організації структури ХТС є послідовне, паралельне, з рециклом (як по матеріальному, так і по енергетичному потоці). Технологічна схема зазвичай включає в себе набір подібних з'єднань елементів. Нижче представлено вирази залежностей

коефіцієнту ефективності η_c від внутрішніх характеристик системи для різних типів з'єднань.

1. Послідовне з'єднання елементів ХТС



$$\begin{aligned}\eta_c &= e_2 / e_1 \\ e_3 &= e_1(1 - \eta_{D1}) = \alpha_{13}e_1 \\ e_4 &= e_3(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{34}e_3 \\ e_2 &= e_4(1 - \eta_{D3}) = \alpha_{42}e_4\end{aligned}$$

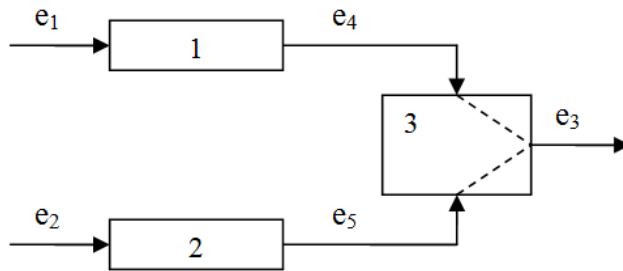
Тут α_{ij} коефіцієнт передачі ексергетичного потоку, який є функцією локальних ексергетичних характеристик елементу

$$\eta_c = \alpha_{13}\alpha_{34}\alpha_{42}.$$

Для N послідовних елементів, коефіцієнт ефективності дорівнює добутку коефіцієнта передачі всіх елементів, з яких складається дана ХТС:

$$\eta_c = \prod \alpha_k.$$

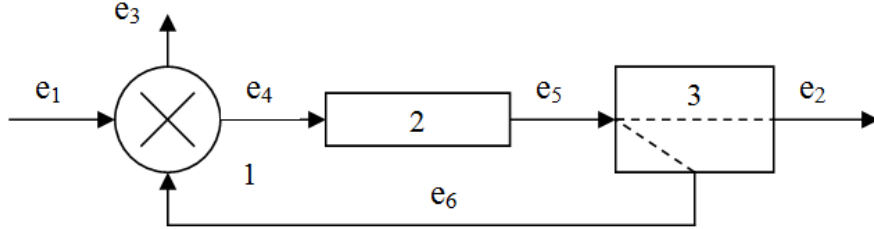
2. Паралельне з'єднання елементів ХТС



$$\begin{aligned}\eta_c &= e_3 / (e_1 + e_2) \\ e_4 &= e_1(1 - \eta_{D1}) = \alpha_{14}e_1 \\ e_5 &= e_2(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{25}e_2 \\ e_3 &= e_4(1 - \eta_{D3}) + e_5(1 - \eta_{D3}) = \alpha_{43}e_4 + \alpha_{53}e_5 \\ \eta_c &= \alpha_{14}\alpha_{43}e_1 / (e_1 + e_2) + \alpha_{25}\alpha_{53}e_2 / (e_1 + e_2)\end{aligned}$$

Таким чином, коефіцієнт ефективності для паралельного з'єднання елементів визначається як сума їх коефіцієнтів ефективності.

3. З'єднання елементів ХТС з рециклом по енергетичному потоку

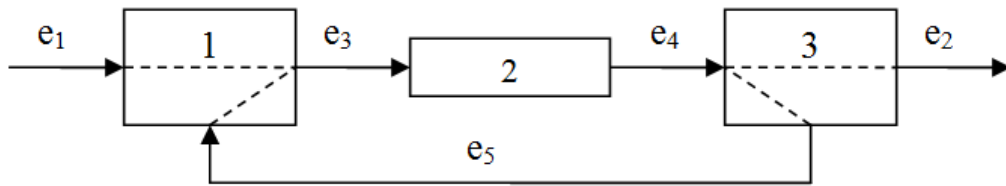


$$\begin{aligned}\eta_c &= (e_3 + e_2) / e_1 \\ e_5 &= e_4(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{45}e_4 \\ e_2 &= e_5(1 - \beta) = \alpha_{52}e_5 \\ e_6 &= e_5\beta = \alpha_{56}e_5 \\ \beta &= e_6 / e_5\end{aligned}$$

Де β – доля ексергії вихідного потоку, що повертається на вхід системи.

$$\begin{aligned}e_4 &= e_1(1 - \eta_{D1} - \eta_{N1}) - e_6(\eta_{D1} + \eta_{N1}) = \alpha_{14}e_1 - \alpha_{64}e_6 \\ e_3 &= e_1\eta_{N1} + e_6(1 + \eta_{D1}) = \alpha_{13}e_1 + \alpha_{63}e_6 \\ \eta_c &= \alpha_{13} + \alpha_{14}\alpha_{63} / (1 - \alpha_{64}\alpha_{45}\alpha_{56}) + \alpha_{14}\alpha_{45}\alpha_{52} / (1 - \alpha_{64}\alpha_{45}\alpha_{56})\end{aligned}$$

4. З'єднання елементів ХТС з рециклом по матеріальному потоку



$$\begin{aligned}\eta_c &= e_2 / e_1 \\ e_4 &= e_3(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{34}e_3 \\ e_2 &= e_4(1 - \beta) = \alpha_{42}e_4 \\ e_5 &= e_4\beta = \alpha_{45}e_4 \\ \beta &= e_5 / e_4 \\ e_3 &= e_1(1 - \eta_{D1}) + e_5(1 - \eta_{D1}) = \alpha_{13}e_1 + \alpha_{53}e_5 \\ \eta_c &= \alpha_{13}\alpha_{34}\alpha_{42} / (1 - \alpha_{45}\alpha_{53}\alpha_{34})\end{aligned}$$

При визначенні схем з рециклом необхідно враховувати величину $1/(1 - p_k)$, де p_k – ефективність, рівна добутку усіх коефіцієнтів передач замкнутого контуру.

Застосовуючи сформульовані правила для розрахунку ефективності послідовного, паралельного з'єднання елементів та схем з рециклом, можна розрахувати термодинамічну ефективність довільної ХТС.

Слід зазначити, що не дивлячись на очевидні переваги ексергетичного методу аналізу, його застосування обмежується рішенням технологічних задач, що містять лише однотипні апарати.

Провести ексергетичний аналіз ХТС (рис. 1.1).

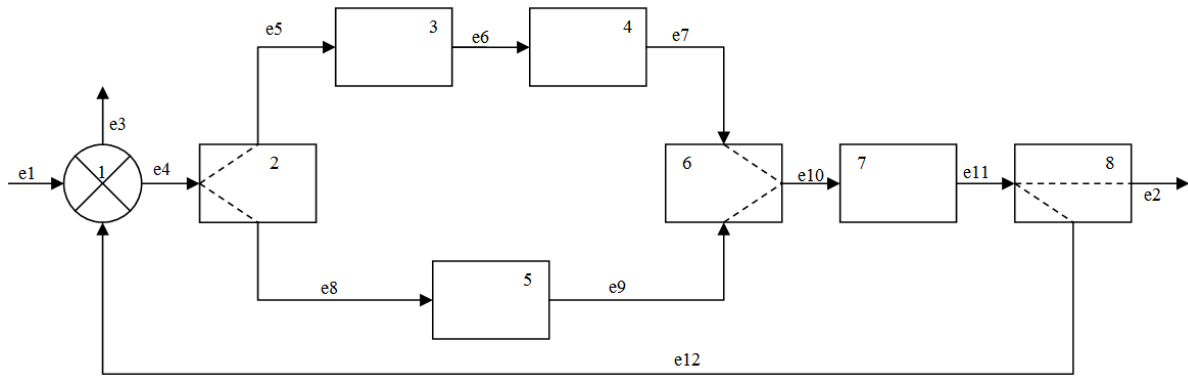


Рис. 1.1. ХТС

$$\eta = (e_3 + e_2) / e_1$$

$$e_5 = \alpha_{4,5} * e_4$$

$$e_6 = \alpha_{5,6} * e_5$$

$$e_7 = \alpha_{6,7} * e_6$$

$$e_8 = \alpha_{4,8} * e_4$$

$$e_9 = \alpha_{8,9} * e_8$$

$$e_{10} = \alpha_{7,10} * e_7 + \alpha_{9,10} * e_9$$

$$e_{11} = \alpha_{10,11} * e_{10}$$

$$e_{12} = \alpha_{11,12} * e_{11}$$

$$e_2 = \alpha_{11,2} * e_{11}$$

$$e_3 = \alpha_{1,3} * e_1 + \alpha_{12,3} * e_{12}$$

$$e_4 = \alpha_{1,4} * e_1 + \alpha_{12,4} * e_{12}$$

Виразимо e_1 через e_4 :

$$e_1 = (e_4 - \alpha_{12,4} * e_{12}) / \alpha_{1,4}$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_1 + \alpha_{12,3} \cdot e_{12} + \alpha_{11,2} \cdot e_{11}}{e_4 - \alpha_{12,4} \cdot e_{12}} \cdot \alpha_{1,4} = \frac{\frac{\alpha_{1,3} \cdot e_4}{\alpha_{1,4}} - \frac{\alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot e_{12}}{\alpha_{1,4}} + \alpha_{12,3} \cdot e_{12} + \alpha_{11,2} \cdot e_{11}}{e_4 - \alpha_{12,4} \cdot e_{12}} \cdot \alpha_{1,4} = \\ &= \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_4 - \alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10} + \alpha_{12,3} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10} + \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10}}{e_4 - \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10}} = \\ &= \left| \begin{aligned} e_{10} &= \alpha_{7,10} \cdot e_7 + \alpha_{9,10} \cdot e_9 = \alpha_{7,10} \cdot \alpha_{6,7} \cdot e_6 + \alpha_{9,10} \cdot \alpha_{8,9} \cdot e_8 = e_4 \cdot (\alpha_{7,10} \cdot \alpha_{6,7} \cdot \alpha_{5,6} \cdot \alpha_{4,5} + \alpha_{9,10} \cdot \alpha_{8,9} \cdot \alpha_{4,8}) \\ A &= (\alpha_{7,10} \cdot \alpha_{6,7} \cdot \alpha_{5,6} \cdot \alpha_{4,5} + \alpha_{9,10} \cdot \alpha_{8,9} \cdot \alpha_{4,8}) \end{aligned} \right| = \\ &= \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_4 - e_4 \cdot A \cdot \alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} + e_4 \cdot A \cdot \alpha_{12,3} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} + e_4 \cdot A \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{10,11}}{e_4 - e_4 \cdot A \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11}} = \\ &= \frac{\alpha_{1,3} + A \cdot (\alpha_{12,3} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} + \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{10,11} - \alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11})}{1 - A \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11}}. \end{aligned}$$

1.2. Хід виконання роботи

За наданою викладачем технологічною схемою провести ексергетичний аналіз ХТС та визначити її термодинамічну ефективність. Розрахунки зробити у системі символьної математики в одному з програмних середовищ MathCAD, MATLAB.

1.3. Складання звіту про лабораторну роботу

У звіті потрібно подати тему і мету роботи, індивідуальне завдання за своїм варіантом, короткі теоретичні відомості, хід виконання роботи, аналіз результатів і висновки за результатами виконання роботи.

1.4. Контрольні питання до роботи № 1

1. Обґрунтувати ексергію як міру якості енергії. Визначення ексергії.
2. Обґрунтувати ексергетичний метод термодинамічного аналізу.
Ексергетичний баланс.
3. Обґрунтувати топологічний метод термoeкономічного аналізу.
Топологічні моделі розподілу витрат.
4. Проаналізувати розрахунок ексергії типових хімічних процесів.
5. Дати оцінку розрахунку ексергії за методом Шаргута.
6. Дати оцінку інженерним методам зниження енергоспоживання в хімічній технології.
7. Провести ексергетичний аналіз довільної ХТС.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ ГРАФОАНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

МЕТА РОБОТИ – освоєння методики та вироблення у студентів умінь побудови оптимальної структури теплообміну за допомогою графоаналітичного методу.

2.1. Основні теоретичні положення

В основі методу лежать наступні допущення:

1. Коефіцієнт теплопередачі K_T приймається постійним для всіх теплообмінників внутрішньої підсистеми.

2. У внутрішній підсистемі використовуються кожухотрубні теплообмінники з поверхнею теплообміну F_{Ti} :

$$F_{Ti} = \frac{Q_{Ti}}{K_i \cdot \Delta t_{cp}^i}$$

де Q_{Ti} - теплове навантаження i -го теплообмінника; Δt_{cp} - середня рушійна сила процесу теплопередачі.

3. Вартість i -го теплообмінного апарата є лінійною функцією від поверхні теплообміну:

$$Z_{к.т.}^i = \alpha (F_{Ti})^b, \quad b=1$$

Тепер задача синтезу внутрішньої підсистеми може бути сформульована в такий спосіб: для заданого загального теплового навантаження визначити структуру взаємозв'язку технологічних потоків і розподіл теплового навантаження в системі так, щоб загальна поверхня теплообміну була мінімальною.

Для визначення необхідних умов оптимальності структури потоків розглянемо кілька теорем.

Теорема 1

Нехай:

1) число гарячих потоків, холодних потоків і теплообмінників однаково:

$$m = n = N;$$

2) теплове навантаження всіх теплообмінників однакове:

$$Q_{T1} = Q_{T2} = \dots = Q_{TN} = Q_s / N ,$$

і всі теплообмінники здатні забезпечити передачу питомого теплового навантаження в бажаному напрямку;

3) водяні еквіваленти однакові для всіх гарячих і холодних потоків;

4) кожен потік вступає в теплообмін один і тільки один раз. Тоді для оптимальності структури взаємозв'язку технологічних потоків необхідно, щоб гарячі й холодні потоки вступали в теплообмін послідовно в порядку спадання їхніх початкових температур.

Наслідок. Нехай:

1) $m \neq n \neq N$ і $N \leq \min\{m, n\}$;

2) кожен потік піддається теплообміну тільки один раз;

3) потоки впорядковані в порядку зменшення їхніх початкових температур:

$$\begin{aligned} T_1^H &> T_2^H > \dots > T_m^H \\ t_1^H &> t_2^H > \dots > t_m^H \end{aligned} .$$

Тоді для оптимальності структури теплової системи необхідно, щоб перший гарячий потік взаємодіяв з $[n - (N-1)]$ холодним потоком, другий гарячий потік - з $[n - (N-2)]$ холодним потоком і т.д.

Таким чином, оптимальною буде структура

$$(G_1, X_{n-(N-1)}), (G_2, X_{n-(N-2)}) \dots (G_N, X_{n-(N-N)}).$$

Теорема 2

Якщо один гарячий і один холодний потоки вступають у теплообмін більш ніж один раз в апаратах з однаковим тепловим навантаженням, то оптимальна структура теплової системи повинна бути протиточною. У цій структурі загальна поверхня не залежить від числа апаратів і дорівнює поверхні теплообмінника, що сприймав би все теплове навантаження. Загальна поверхня теплообміну не залежить від розподілу теплового навантаження в протиточній структурі.

Теорема 3

Нехай один гарячий й один холодний потоки відповідно розбиваються на декілька підпотоків, і кожен підпотік вступає в теплообмін один і тільки один раз. Тоді необхідною умовою оптимальності структури теплової системи є рівність витрат і теплового навантаження підпотоків:

$$G_{xi} / G_x = G_{Gi} / G_G = Q_{Ti} / G_s, \quad (i = 1, 2, 3 \dots k)$$

Загальна поверхня теплообміну не залежить від кількості апаратів і дорівнює поверхні теплообмінника, що працює під загальним тепловим навантаженням.

Для рішення задачі синтезу теплової системи вводиться графічне представлення ентальпії вихідних гарячих і холодних технологічних потоків у вигляді діаграм ентальпії потоків (ДЕП). На вертикальних осях ДЕП (рис. 2.1) відкладаються початкові та кінцеві температури вихідних потоків, причому початок температурних шкал для гарячих і холодних потоків рознесено таким чином, щоб всі гарячі потоки розташовувались вище горизонтальної осі та всі холодні – нижче за неї.

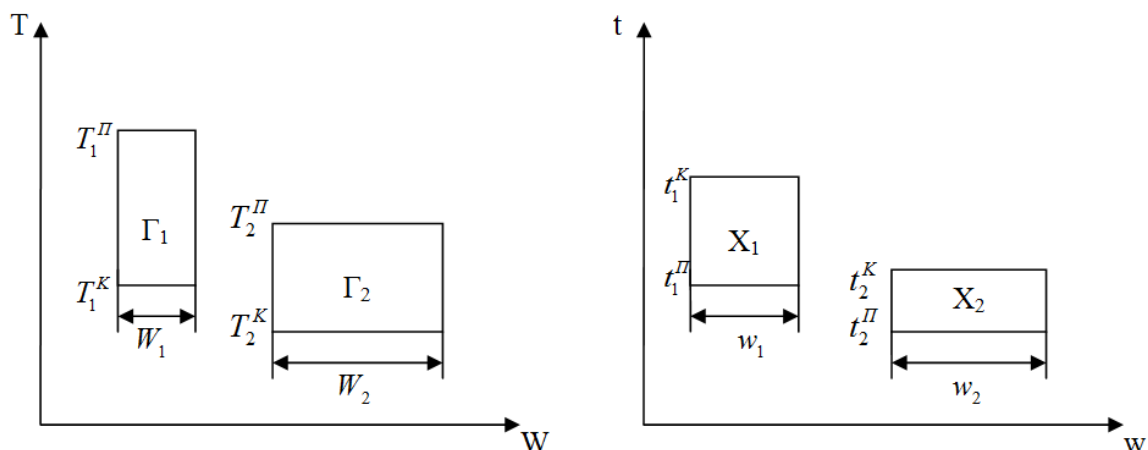


Рис. 2.1. Ентальпійна діаграма вихідних технологічних потоків

По горизонтальній осі відкладаються водянні еквіваленти вихідних технологічних потоків. Початок горизонтальної шкали для кожного потоку розташовується окремо. У такий спосіб на діаграмі кожному потоку відповідає окремий блок. Площа цього блоку дорівнює кількості тепла, яку необхідно передати потоку або відібрати від потоку, щоб його температура досягла необхідного кінцевого значення. Блоком, що відповідають потокам, які вступають у взаємний теплообмін, привласнюються однакові номери. Очевидно, що однойменні блоки повинні мати однакові площі.

Блоки можна ділити на частині як горизонтально, так і вертикально. Горизонтальне розділення блоків означає збільшення числа апаратів у синтезованій тепловій системі, а вертикальне розділення блоків відповідає розділенню потоків на підпотоки.

З теорем 1 – 3 випливає, що якщо структура системи задовольняє рішення загальної задачі, те ДЕП повинна мати наступні властивості:

- 1) блоки, що відповідають гарячим і холодним потокам, розташовуються у порядку спадання їхніх початкових температур;
- 2) кінцева температура j -го «гарячого» блоку не може бути нижче початкової температури $(j + 1)$ -го блоку, а початкова температура i -

го «холодного» блоку не може бути нижче кінцевої температури $(i+1)$ -го блоку;

- 3) якщо загальне теплове навантаження системи менше, ніж кількість тепла, яку необхідно як передати холодним потокам, так і відібрати у гарячих потоків, то частина «холодних» блоків з найвищою температурою повинна вступити у взаємний теплообмін.

Задача синтезу оптимальної структури внутрішньої підсистеми формулюється в такий спосіб: за допомогою ДЕП задані параметри вихідних потоків і загальна кількість тепла Q_s , що передається у внутрішній підсистемі. Необхідно побудувати систему теплообмінників мінімальної сумарної поверхні, здатних передати кількість тепла Q .

Задача синтезу внутрішньої підсистеми вирішується в результаті перетворення температурно - ентальпійної діаграми, що відповідає вихідній задачі, у діаграму оптимальної структури теплової системи.

Як приклад розглянемо етапи перетворення вихідної ДЕП при рішенні задачі синтезу оптимальної внутрішньої підсистеми для чотирьох вихідних потоків, параметри яких представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри стану вихідних технологічних потоків

| Потоки | Температура, °C | | Водяной еквівалент, $W \cdot 10^{-3}$, |
|-------------|-----------------|---------|---|
| | початкова | кінцева | |
| Гарячий Г1 | 600 | 450 | 45 |
| Гарячий Г2 | 550 | 400 | 40 |
| Гарячий Г3 | 400 | 250 | 40 |
| Холодний Х1 | 50 | 450 | 50 |

Побудова ДЕП відповідній оптимальній структурі, здійснюється по наступних етапах (рис. 2.2):

1) Будують діаграму для вихідних потоків, розташовуючи холодні й гарячі потоки в порядку спадання їх початкових температур.

2) У верхній частині блоків гарячих потоків і нижньої частини блоків холодних потоків виділяється площа, рівна Q_s - кількості тепла, що передається у внутрішній підсистемі.

(У прикладі $Q_s = \sum Q_{Gi} = 1,875$ кВт). Частини блоків, що не потрапили в окрему область (на рис. 2.2а заштриховані), тимчасово відкидаються. Це кількість тепла, що буде передано в зовнішній підсистемі і на аналіз внутрішньої підсистеми не вплине.

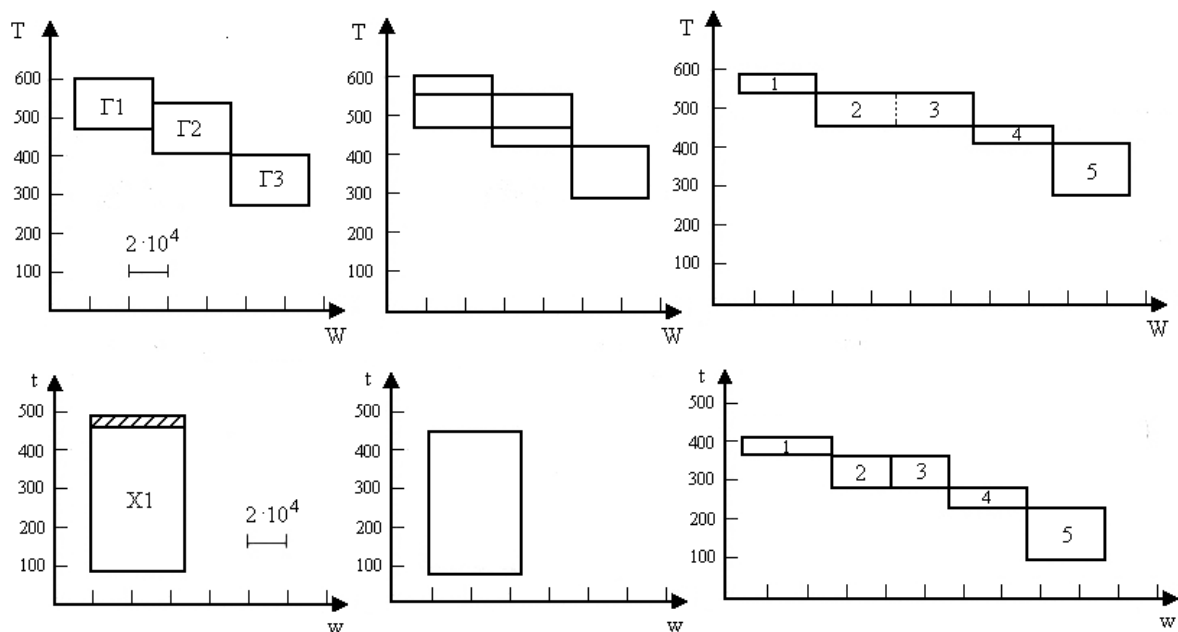


Рис. 2.2. Етапи синтезу внутрішньої системи
(номера прямокутників – номери теплообмінників)

3) Частини блоків, що залишилися, діляться горизонтальними лініями на рівні температурних меж інших блоків; частини блоків, що

відповідають різним вихідним потокам, які розташовані на одному температурному інтервалі, поєднуються в один блок. Вертикальні межі, що відповідають розмежуванню різних потоків, зберігаються у вигляді пунктирних ліній (див. рис. 2.2 б).

4) Зрівнюються за ентальпіями верхній гарячий і холодний блоки. Для чого з більшого блоку відрізається високотемпературна частина, рівна площі меншого блоку, інша частина зміщується. Якщо один з менших блоків складається з декількох вихідних частин, то блок, що зрівнюється, ділиться вертикально на такі ж по площі частини. Відповідним частинам блоків приписуються однакові номери (див. рис. 2.2в).

5) По отриманій діаграмі будується оптимальна технологічна схема внутрішньої підсистеми (рис. 2.3).

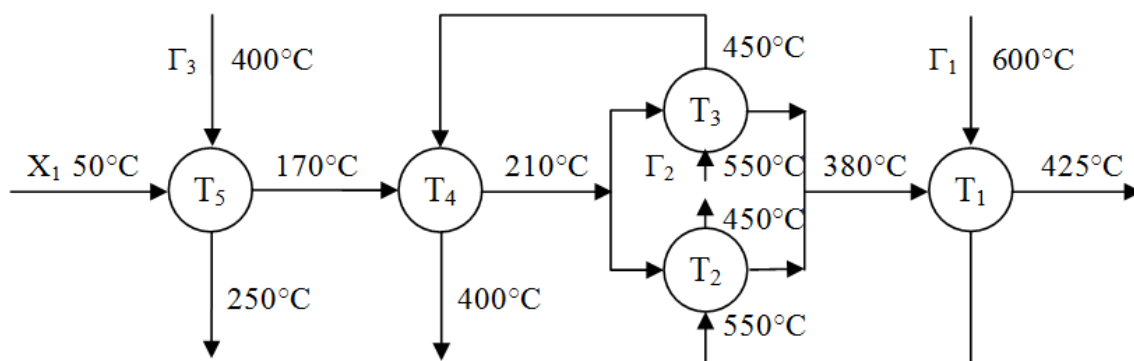


Рис. 2.3. Оптимальна структура внутрішньої підсистеми

Для тих потоків, які не досягли необхідної кінцевої температури, необхідно підібрати відповідні холодильники й нагрівачі. У розглянутому прикладі перший холодний потік нагрівається в зовнішній підсистемі від температури 425 до 450 С. Однак завершення синтезу внутрішньої й зовнішньої підсистем ще не означає завершення синтезу всієї системи, тому що оптимальне значення Q_s поки не знайдене.

Рішення задачі синтезу оптимальної структури являють собою ітераційний процес. При завершенні синтезу внутрішньої і зовнішньої підсистем кінцеві значення температур приймаються за постійні, а величини теплового навантаження й частки розподілу потоків є оптимізуючими змінними. Блок-схема алгоритму синтезу оптимальної теплової системи наведена на рис. 2.4.

До переваг розглянутого методу синтезу оптимальних теплових систем варто віднести його простоту та наочність. Метод дозволяє значно поліпшити існуючі схеми теплових систем.

У той же час графоаналітичний метод має ряд недоліків, обумовлених прийнятими вихідними допущеннями. Так, відомо, що вартість теплообмінників зростає пропорційно зростанню їх поверхні в ступені 0.6-0.7, тоді як у теплообмінниках внутрішньої підсистеми вона дорівнює одиниці. Це приводить до появи у внутрішній підсистемі більшої кількості теплообмінників малої площі.

Отримана технологічна схема характеризується надмірною складністю, що призводить до великого збільшення капітальних й експлуатаційних витрат на монтаж теплової системи (40% від вартості теплообмінників) і електроенергію, необхідну для перекачування рідин, які в процесі синтезу не враховуються. Щоб уникнути такого ефекту, пропонується поєднувати близькі температурні рівні, однак цього може виявитися недостатньо.

Поряд із цим, необхідно відзначити наступне. На підставі теорем 2 й 3 будь-який теплообмінник в оптимальній структурі може бути замінений будь-якою кількістю паралельних прямоточних й (або) протиточних апаратів без зміни загальної поверхні теплообміну, що припускає множинність рішення. Саме їй і обумовлений ітераційний процес синтезу.



Рис. 2.4. Блок-схема алгоритму синтезу теплових систем графоаналітичним методом

Для вибору оптимальної структури може бути використаний додатковий критерій - мінімальна кількість апаратів. Якщо теплообмінник, включений в оптимальну структуру, занадто великий для реалізації, він може бути розділений на декілька теплообмінників з меншою поверхнею теплопередачі, після чого необхідно знову провести оптимізацію зміненої структури.

2.2. Хід виконання роботи

За наданою викладачем завданням побудувати ентальпійну діаграму технологічних потоків, за якою провести аналіз та синтезувати оптимальну технологічну схему внутрішньої підсистеми. Доповнити цю схему

зовнішньою підсистемою. Проаналізувати отримані результати. Отриманий результат відобразити у вигляді оптимальної схеми теплообміну.

2.3. Складання звіту про лабораторну роботу

У звіті потрібно подати тему і мету роботи, індивідуальне завдання за своїм варіантом, короткі теоретичні відомості, хід виконання роботи, аналіз результатів і висновки за результатами виконання роботи. Всі розрахунки зробити в одному з програмних середовищ: VBA, MathCAD, MATLAB.

2.4. Контрольні питання до роботи № 2

1. Постановка задачі синтезу теплообмінної системи.
2. Модулі для розрахунку теплообмінників.
3. Графічне представлення систем теплообмінну.
4. Матричне представлення систем теплообмінну.
5. Аналіз систем теплообміну.
6. Класифікація методів синтезу систем теплообмінну.
7. Основні теореми графоаналітичного методу синтезу теплообмінних систем.
8. Алгоритм графоаналітичного методу синтезу теплообмінних систем.

Лабораторна робота 3

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ ЗА ЕВРИСТИЧНИМИ ПРАВИЛАМИ

МЕТА РОБОТИ – освоєння методики та вироблення у студентів уміння синтезувати оптимальну структуру теплообміну за допомогою евристичних правил.

3.1. Основні теоретичні положення

Задача синтезу теплових систем розв’язується формуванням множини можливих комбінацій початкових гарячих і холодних потоків для проведення операцій теплообміну, що фізично реалізуються, в теплообмінному апараті. Для цього будують таблицю пар взаємодіючих потоків, виходячи з умови передачі максимально можливої кількості тепла в одному теплообмінному апараті при мінімально допустимій різниці температур на кінцях теплообмінника $\Delta t_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$. З таблиці пар за допомогою того або іншого евристичного правила вибирається пара потоків, що вступатимуть у взаємний теплообмін. Якщо в результаті теплообміну дані потоки досягли заданих кінцевих температур, то вони виключаються з розгляду. У іншому разі початковим температурам цих потоків привласнюються значення кінцевих температур результуючих потоків, після чого таблиця пар перебудовується і вибирається нова пара потоків. Дана операція проводиться до тих пір, поки не залишиться потоків, здатних вступити у взаємний теплообмін або всі потоки досягнуть необхідних кінцевих температур.

Модуль теплообмінника будується таким чином:

1. якщо $T_j^0 - t_i^0 < \Delta t_{\min}$, то теплообмін не можливий:

$$Q_T = 0, \quad T_j^1 = T_j^0, \quad t_i^1 = t_i^0;$$

2. якщо $T_j^K - t_i^0 < \Delta t_{\min}$, то $T_j^1 = t_i^0 + \Delta t_{\min}$, інакше $T_j^1 = T_j^K$;

3. якщо $T_j^0 - t_i^K < \Delta t_{\min}$, то $t_i^1 = T_j^0 - \Delta t_{\min}$, інакше $t_i^1 = t_i^K$;

$$4. \quad Q_X = \omega_i(t_i^1 - t_i^0), \quad Q_T = W_j(T_j^0 - T_j^1), \quad Q_T = \min(Q_X, Q_T);$$

$$5. \quad t_i^1 = t_i^0 + Q_T / \omega_i, \quad T_j^1 = T_j^0 - Q_T / W_j;$$

$$6. \quad F_T = Q_T / (K_T \Delta t_{\text{ср}}), \quad 3_{K.T} = \alpha F_T^B.$$

Модуль холодильника:

$$1. \quad Q = W_j(T_j^0 - T_j^K);$$

2. якщо $T_j^0 - t_X^K < \Delta t_{\min}$, то $t_X^1 = T_j^0 - \Delta t_{\min}$, інакше $t_X^1 = t_X^K$;

$$3. \quad F_X = Q / (K_X \Delta t_{\text{ср}}), \quad 3_{K.T} = \alpha F_X^B$$

$$4. \quad 3_{E.X} = \tau Q C_X / (c_X(t_X^1 - t_X^{\text{II}})),$$

де T_j^0 – температура j -го холодного потоку на вході в холодильник; K_X – коефіцієнт теплопередачі в холодильнику, значення якого задане; $3_{E.X}$ – експлуатаційні витрати на холодоагент.

Модуль нагрівача:

$$1. \quad Q = \omega_i(t_i^K - t_i^0);$$

$$2. \quad \Delta t_0 = T_T - t_i^0, \quad \Delta t_1 = T_T - t_i^K;$$

$$3. \quad F_H = Q / (K_H \Delta t_{\text{ср}}), \quad 3_{K.H} = \alpha F_H^B;$$

$$4. \quad 3_{E.H} = \tau Q C_H / \lambda,$$

де t_i^0 – температура i -го холодного потоку на вході в нагрівач; K_H – коефіцієнт теплопередачі в нагрівачі, значення якого задане; $3_{E.H}$ – експлуатаційні витрати на теплоагент; T_T – температура теплоагенту.

Приведені річні витрати для системи теплообміну:

$$3_{п.г} = 3 + 3',$$

де:

$$3 = c \sum_{l=1}^N 3_{к.т}^l; \quad 3' = 3'_к + 3'_е; \quad 3_{к.т}^l = a(F_{т_l})^b; \quad 3'_к = c \left(\sum_{l=1}^{N_x} 3_{к.х}^l + \sum_{l=1}^{N_H} 3_{к.н}^l \right); \quad 3_{к.х}^l = a(F_{х_l})^b; \\ 3_{к.н}^l = a(F_{н_l})^b; \quad 3'_е = \tau \left(\sum_{l=1}^{N_x} \frac{Q_l C_x}{c_x (t_x^K - t_x^H)} + \sum_{l=1}^{N_H} \frac{Q_l C_{г}}{\lambda} \right);$$

де $3_{п.г}$ – приведені річні витрати; 3 – витрати на внутрішню систему, грн. / год.; $3'$ – витрати на зовнішню систему, грн. / год.; $3'_к$ – капітальні витрати на зовнішню систему, грн. / год.; $3'_е$ – експлуатаційні витрати на зовнішню систему, грн. / год.; c – нормативний коефіцієнт амортизації, 1/год; N, N_x, N_H – кількість теплообмінників, холодильників і нагрівачів; $3_{к.т}^l, 3_{к.х}^l, 3_{к.н}^l$ – капітальні витрати на l -й теплообмінник, холодильник і нагрівач; a, b – вартісні коефіцієнти, $a > 0$; $0 < b < 1$; $F_{т_l}, F_{х_l}, F_{н_l}$ – поверхні теплообміну l -го теплообмінника, холодильника і нагрівача, м²; τ – час роботи системи, рік/рік; Q_l – кількість тепла, яке передається в l -му холодильнику або нагрівачі, Дж / год.; $C_x, C_{г}$ – ціни холодо- і теплоагенту, грн. / кг; c_x – теплоємність холодоагенту, Дж / (кг · К); t_x^K, t_x^H – початкова і кінцева температури холодоагенту; λ – питома теплота паротворення теплоагенту, Дж / кг.

3.2. Хід виконання роботи

За наданою викладачем завданням провести аналіз технологічних потоків та синтезувати оптимальну технологічну схему внутрішньої підсистеми. Доповнити цю схему зовнішньою підсистемою. Проаналізувати отримані результати. Отриманий результат відобразити у вигляді оптимальної схеми теплообміну.

Синтез оптимальної структури системи теплообміну провести за наступними евристичними правилами:

1) вибрати для теплообміну гарячий потік з найбільш високою температурою на вході у теплообмінник та холодний – з найбільш високою на виході з теплообмінника;

2) вибрати для теплообміну холодний потік з найбільш низькою температурою на вході і гарячий потік з найбільш високою температурою на виході з теплообмінника.

Розглянемо приклад. Задані параметри стану технологічних потоків (табл.3.1).

Проведемо два розрахунки системи теплообміну із випадковим набором евристик.

Таблиця 3.1. Параметри стану технологічних потоків

| Потоки | Температура, К | | Водяний еквівалент, кВт / К |
|----------|----------------|---------|--------------------------------|
| | початкова | кінцева | |
| Холодний | 300 | 410 | 11 |
| Холодний | 330 | 400 | 8 |
| Холодний | 340 | 395 | 6 |
| Гарячий | 500 | 410 | 11 |
| Гарячий | 450 | 380 | 9 |
| Гарячий | 455 | 400 | 8 |

Перший розрахунок

Перший етап синтезу. Застосуємо евристику № 1. Згідно неї потрібно вибрати другий холодний та перший гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.2), холодний потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.2. Перший етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 300 | 390.00 | 1 | 500 | 410 | — | — |
| 2 | 330 | 400.00 | 1 | 500 | 449.09 | 293.70 | 14611 |
| 3 | 340 | 395.00 | 1 | 500 | 470.00 | 161.56 | 10208 |
| 1 | 300 | 357.27 | 2 | 450 | 380.00 | 418.80 | 18078 |
| 2 | 330 | 400.00 | 2 | 450 | 387.78 | 596.55 | 22353 |
| 3 | 340 | 395.00 | 2 | 450 | 413.33 | 296.75 | 14702 |
| 1 | 300 | 340.00 | 3 | 455 | 400.00 | 234.94 | 12780 |
| 2 | 330 | 385.00 | 3 | 455 | 400.00 | — | — |
| 3 | 340 | 395.00 | 3 | 455 | 413.75 | 283.79 | 14313 |

Другий етап синтезу Застосуємо евристику № 1. Згідно неї потрібно вибрати третій холодний та третій гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.3), холодний потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.3. Другий етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 300 | 339.09 | 1 | 449.09 | 410.00 | — | — |
| 3 | 340 | 395.00 | 1 | 449.09 | 419.09 | 287.40 | 14423 |
| 1 | 300 | 357.27 | 2 | 450.00 | 380.00 | 418.80 | 18078 |
| 3 | 340 | 395.00 | 2 | 450.00 | 413.33 | 296.75 | 14702 |
| 1 | 300 | 340.00 | 3 | 455.00 | 400.00 | 234.94 | 12780 |
| 3 | 340 | 395.00 | 3 | 455.00 | 413.75 | 283.79 | 14313 |

Третій етап синтезу. Застосуємо евристику № 2. Згідно неї потрібно вибрати перший холодний та другий гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.4), гарячий потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.4. Третій етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 300 | 339.09 | 1 | 449.09 | 410 | — | — |
| 1 | 300 | 357.27 | 2 | 450.00 | 380 | 418.80 | 18078 |
| 1 | 300 | 310.00 | 3 | 413.75 | 400 | 61.884 | 5739.8 |

Четвертий етап синтезу. Виключимо евристику № 1, бо немає з чого обирати потоки. Розглянемо перший холодний та третій гарячий потоки. Гарячий потік досягає потрібної вихідної температури (табл. 3.5).

Подальший розрахунок внутрішньої підсистеми теплообміну неможливий, бо немає теплообміну між потоком № 1.

Розрахунок зовнішньої підсистеми теплообміну наведено у табл. 3.6 – 3.7.

Приведені затрати синтезованої системи: 78902.4.

Таблиця 3.5. Четвертий етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 357.27 | 396.36 | 1 | 449.09 | 410 | — | — |
| 1 | 357.27 | 367.27 | 3 | 413.75 | 400 | 141.41 | 9423.9 |

Таблиця 3.6. Нагрівач для холодного потоку

| № хол. пот. | Кількість тепла, що передається в апараті, кВт | Витрата пару, кг / год. | Площа теплообмінного апарату, м ² | Вартість апарату |
|-------------|--|-------------------------|--|------------------|
| 1 | 470.03 | 890.58 | 150.75 | 9792.5 |

Таблиця 3.7. Холодильник для гарячого потоку

| № гар. пот. | Кількість тепла, що передається в апараті, кВт | Витрата пару, кг / год. | Площа теплообмінного апарату, м ² | Вартість апарату |
|-------------|--|-------------------------|--|------------------|
| 1 | 429.99 | 6157.40 | 232.02 | 12684 |

Другий розрахунок

Перший етап синтезу. Застосуємо евристику № 2. Згідно неї потрібно обрати перший холодний та другий гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.8), гарячий потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.8. Перший етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|-------------|-----------------|------------------|-------------|-----------------|------------------|---------------|-------------------------|
| 1 | 300 | 390 | 1 | 500 | 410 | — | — |
| 2 | 330 | 400 | 1 | 500 | 449.09 | 293.70 | 14611 |
| 3 | 340 | 395 | 1 | 500 | 470 | 161.56 | 10208 |
| 1 | 300 | 357.27 | 2 | 450 | 380 | 418.80 | 18078 |
| 2 | 330 | 400 | 2 | 450 | 387.78 | 596.55 | 22353 |
| 3 | 340 | 395 | 2 | 450 | 413.33 | 296.75 | 14702 |
| 1 | 300 | 340 | 3 | 455 | 400 | 234.94 | 12780 |
| 2 | 330 | 385 | 3 | 455 | 400 | — | — |
| 3 | 340 | 395 | 3 | 455 | 413.75 | 283.79 | 14313 |

Другий етап синтезу. Застосуємо евристику №2. Згідно неї потрібно обрати перший холодний та другий гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.9), гарячий потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Третій етап синтезу. Застосуємо евристику №1. Згідно неї потрібно вибрати другий холодний та перший гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.10), холодний потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.9. Другий етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 357.27 | 410 | 1 | 500 | 447.27 | — | — |
| 2 | 330 | 400 | 1 | 500 | 449.09 | 293.70 | 14611 |
| 3 | 340 | 395 | 1 | 500 | 470 | 161.56 | 10208 |
| 1 | 357.27 | 397.27 | 3 | 455 | 400 | 505.77 | 20245 |
| 2 | 330 | 385 | 3 | 455 | 400 | — | — |
| 3 | 340 | 395 | 3 | 455 | 413.75 | 283.79 | 14313 |

Таблиця 3.10. Третій етап синтезу

| № хол. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. пот. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 357.27 | 396.36 | 1 | 449.09 | 410 | — | — |
| 3 | 340 | 395 | 1 | 449.09 | 419.09 | 287.40 | 14423 |
| 1 | 357.27 | 397.27 | 3 | 455 | 400 | 505.77 | 20245 |
| 3 | 340 | 395 | 3 | 455 | 413.75 | 283.79 | 14313 |

Четвертий етап синтезу. Застосуємо евристику №1. Згідно неї потрібно вибрати перший холодний та третій гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.11), гарячий потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.11. Четвертий етап синтезу

| № ХОЛ. ПОТ. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | № гар. ПОТ. | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вих}}$ | F | Вартість теплообмінника |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|--------------|----------------------------|
| 1 | 397.27 | 410 | 1 | 449.09 | 436.36 | — | — |
| 3 | 340 | 395 | 1 | 449.09 | 419.09 | 287.4 | 14423 |

Виключимо евристику №2, бо немає з чого обирати потоки. Розглянемо третій холодний та перший гарячий потоки. Холодний потік досягає потрібної вихідної температури.

Подальший розрахунок внутрішньої підсистеми теплообміну неможливий, бо немає теплообміну між потоком №1.

Розрахунок зовнішньої підсистеми теплообміну наведено у табл. 3.12–3.13. Приведені затрати синтезованої системи: 78429.8.

Таблиця 3.12. Нагрівач для холодного потоку

| № ХОЛ. ПОТ. | Кількість тепла, що передається в апараті, кВт | Витрата пару, кг / год. | Площа теплообмінного апарату, м ² | Вартість апарату |
|-------------------|--|----------------------------|--|---------------------|
| 1 | 140.03 | 265.32 | 52.498 | 5200.4 |

Таблиця 3.13. Холодильник для гарячого потоку

| № гар. ПОТ. | Кількість тепла, що передається в апараті, кВт | Витрата пару, кг / год. | Площа теплообмінного апарату, м ² | Вартість апарату |
|----------------|--|----------------------------|--|---------------------|
| 1 | 99.99 | 1431.80 | 64.286 | 5872.4 |

Порівнюючи приведені затрати синтезованої системи теплообміну по першому варіанту (78902.4) та по другому варіанту (78429.8), робимо висновок, що друга отримана схема є оптимальною.

Оптимальна схема теплообміну показана на рис. 3.1.

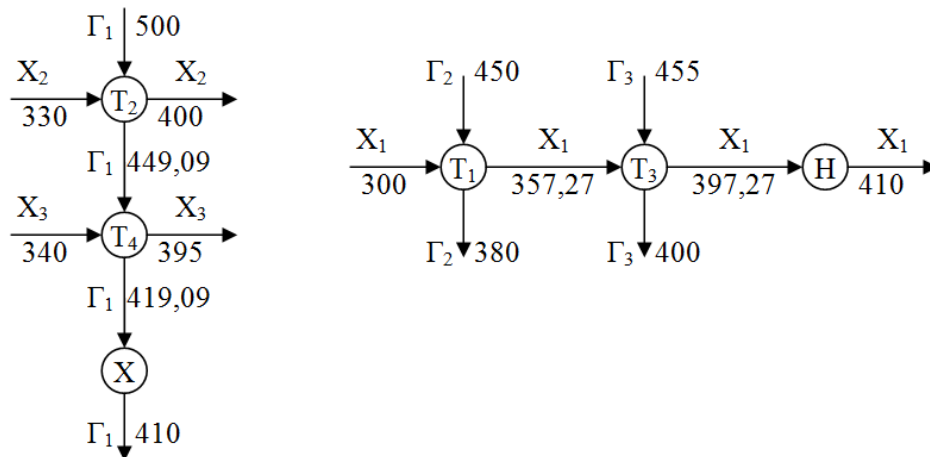


Рис. 3.1. Оптимальна схема теплообміну

3.2. Складання звіту про лабораторну роботу

У звіті потрібно подати тему і мету роботи, індивідуальне завдання за своїм варіантом, короткі теоретичні відомості, хід виконання роботи, аналіз результатів і висновки за результатами виконання роботи. Всі розрахунки зробити в одному з програмних середовищ: VBA, MathCAD, MATLAB.

3.3. Контрольні питання до роботи № 3

1. Постановка задачі синтезу теплообмінної системи.
2. Модулі для розрахунку теплообмінників.
3. Графічне представлення систем теплообміну.
4. Матричне представлення систем теплообміну.
5. Класифікація методів синтезу систем теплообміну.
6. Аналіз систем теплообміну.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

МЕТА РОБОТИ – освоєння методики та вироблення у студентів уміння синтезувати оптимальну структуру теплообміну за допомогою теорії нечітких множин.

4.1. Основні теоретичні положення

В процесі синтезу оптимальної структури системи теплообміну використовують наступні евристичні правила.

Правило 1

Для теплообміну вибираються холодний і гарячий потоки, що мають найбільші початкові температури, якщо виконуються наступні критерії:

а) різниця зазначених температур K_{11} наближається до найбільшого можливого значення:

$$K_{11} = (T_{г.н.} - T_{х.н.}) \rightarrow \max; \quad (K_{11} > \Delta T; \Delta T = 20)$$

б) зміна температури гарячого потоку K_{12} не дуже велика:

$$K_{12} = (T_{г.н.} - T_{г.д.}) - \text{не дуже велика.}$$

де ΔT – припустима різниця температур на кінцях протиточного теплообмінного апарата. Звичайно приймають при розрахунках $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

$T_{г.д.}$ – досягнута температура гарячого потоку.

Правило 2

Для теплообміну вибирають холодний потік, що має максимальну кінцеву температуру, і гарячий потік, що має максимальну початкову температуру, якщо виконані наступні критерії:

а) різниця зазначених температур прагне до максимуму:

$$K_{21} = (T_{\text{г.н.}} - T_{\text{х.к.}}) \rightarrow \max; \quad (K_{21} > \Delta T)$$

б) якщо при теплообміні досягнута температура гарячого потоку наближається до своєї заданої кінцевої температури:

$$K_{22} = (T_{\text{г.д.}} - T_{\text{г.к.}}) \rightarrow \min$$

в) якщо при теплообміні досягнута температура холодного потоку $T_{\text{х.д.}}$ наближається до своєї заданої початкової температури:

$$K_{23} = (T_{\text{х.д.}} - T_{\text{х.н.}}) \rightarrow \min$$

Розрахунок досягнутих температур здійснюється за наступним алгоритмом:

1. Обчислити кількість переданої теплоти:

$$Q_{\text{г.}} = W_{\text{г.}} \cdot (T_{\text{г.н.}} - T_{\text{г.к.}}); \quad Q_{\text{х.}} = W_{\text{х.}} \cdot (T_{\text{х.к.}} - T_{\text{х.н.}}).$$

2. Знайти мінімальне значення Q :

$$Q = \min(Q_{\text{г.}}, Q_{\text{х.}}).$$

3. Порівняти водяні еквіваленти. Якщо $W_{\text{г.}} > W_{\text{х.}}$, то виконати пункт 6, інакше пункт 4.

4. Обчислити припустиму кількість переданої теплоти:

$$Q_{\text{д.}} = \frac{(T_{\text{г.н.}} - T_{\text{х.к.}} - \Delta T)}{\frac{1}{W_{\text{г.}}} - \frac{1}{W_{\text{х.}}}}$$

5. Якщо $Q_{\text{д.}} < Q$, то прийняти $Q = Q_{\text{д.}}$.

6. Обчислити досягнуті температури потоків:

$$T_{\text{г.д.}} = T_{\text{г.н.}} - \frac{Q}{W_{\text{г.}}}; \quad T_{\text{х.д.}} = T_{\text{г.к.}} - \frac{Q}{W_{\text{х.}}}.$$

Правило 3

Для теплообміну вибираються холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою, якщо виконуються наступні критерії:

а) різниця зазначених температур K_{31} наближається до найбільшого можливого значення:

$$K_{31} = (T_{\text{г.к.}} - T_{\text{х.н.}}) \rightarrow \max; \quad (K_{31} > \Delta T)$$

б) досягнута температура гарячого потоку $T_{\text{г.д.}}$ наближається до своєї заданої початкової температури:

$$K_{32} = (T_{\text{г.н.}} - T_{\text{г.д.}}) \rightarrow \min$$

в) досягнута температура холодного потоку $T_{\text{х.д.}}$ наближається до своєї заданої кінцевої температури:

$$K_{33} = (T_{\text{х.к.}} - T_{\text{х.д.}}) \rightarrow \min.$$

Розрахунок досягнутих температур для правил 1 і 3 здійснюється за алгоритмом, схожим на алгоритм розрахунку цих величин за правилом 2.

При моделюванні нечітких понять («більше», «менше», «ближче» і т.п.) використовують функції приналежності i -го правила для критерію j :

$$F_{ij}(x) = (1 + mx^n)^{-1}; \quad G_{ij}(x) = 1 - (1 - mx^n)^{-1}$$

Тут x – чисельне значення одного із критеріїв K_{ij} , m і n – емпіричні коефіцієнти для обчислення функції приналежності (значення m і n приведені у табл. 4.1).

Нечіткий алгоритм синтезу оптимальної структури систем теплообміну:

1. Введення вихідних даних.
2. Вибір трьох пар потоків, які відповідають першому, другому й третьому правилам.

3. Для кожної обраної пари потоків здійснюють розрахунок теплообмінної апаратури і температур, що досягаються.

4. Для обраних варіантів теплообміну обчислюють функції приналежності F_{ij} .

5. Для кожного правила знаходять мінімальне значення функції приналежності:

$$\begin{aligned}F_1 &= \min (G_{11}, F_{12}); \\F_2 &= \min (G_{21}, F_{22}, F_{23}); \\F_3 &= \min (G_{31}, F_{32}, F_{33})\end{aligned}$$

6. Визначають максимальне із трьох мінімальних значень функцій приналежності:

$$P = \max(F_1, F_2, F_3).$$

7. Знаходять ту пару потоків, які відповідають значенню P .

8. Якщо для цієї пари один з потоків досяг заданої температури, то його виключають із подальшого розгляду. У протилежному випадку привласнюють нові значення температур.

Якщо в системі ще є гарячі та холодні потоки, то алгоритм триває з пункту 2. У протилежному випадку переходять до синтезу зовнішньої системи теплообміну.

Таблиця 4.1. Значення коефіцієнтів m і n для обчислення функції приналежності

| ПРАВИЛО | КРИТЕРІЙ | m | n | ФУНКЦІЯ |
|---------|----------|-------------------|-------|---------|
| 1 | 1 | $3,66 * 10^{-12}$ | 5,87 | $G(x)$ |
| | 2 | $8,93 * 10^{-6}$ | 2,41 | $F(x)$ |
| 2 | 1 | $2,881 * 10^{-2}$ | 0,839 | $G(x)$ |
| | 2 | $1,398 * 10^{-3}$ | 3,221 | $F(x)$ |
| | 3 | $1,398 * 10^{-3}$ | 3,221 | $F(x)$ |
| 3 | 1 | $2,881 * 10^{-2}$ | 0,839 | $G(x)$ |
| | 2 | $1,398 * 10^{-3}$ | 3,221 | $F(x)$ |
| | 3 | $1,398 * 10^{-3}$ | 3,221 | $F(x)$ |

4.2. Приклад виконання роботи

За наданою викладачем завданням синтезувати оптимальну структуру системи теплообміну на основі теорії нечітких множин.

Задані параметри стану технологічних потоків (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Вихідні дані для синтезу теплової системи

| Номер | Холодні потоки | | | Гарячі потоки | | |
|-------|----------------|---------|---------------------------|---------------|---------|---------------------------|
| | Температура | | Водяной еквівалент, кВт/К | Температура | | Водяной еквівалент, кВт/К |
| | Початкова | Кінцева | | Початкова | Кінцева | |
| 1 | 293 | 393 | 12 | 473 | 343 | 12 |
| 2 | 378 | 438 | 12 | 438 | 378 | 9 |
| 3 | 313 | 353 | 6 | 403 | 363 | 6 |

Перший етап синтезу теплової системи

За правилом 1 вибираємо для теплообміну холодний і гарячий потоки, що мають максимальні початкові температури:

гарячий потік 2 ($473\text{ K} \rightarrow 343\text{ K}$),

холодний потік 2 ($378\text{ K} \rightarrow 438\text{ K}$).

Розраховуємо кількості теплоти:

$$Q_{г.} = 12 \cdot (473 - 343) = 12 \cdot 130 = 1560 \text{ кВт};$$

$$Q_{х.} = 12 \cdot (438 - 378) = 12 \cdot 60 = 720 \text{ кВт};$$

$$Q = \min(1560; 720) = 720 \text{ кВт}.$$

У процесі теплообміну гарячий потік буде охолоджений тільки до температури:

$$T_{г.д.} = 473 - 720/12 = 413\text{ K}.$$

Це досягнуте значення температури тут і далі вказується в дужках на схемі теплообміну:

$$(413) \quad 343 \leftarrow 473, \\ 378 \rightarrow 438.$$

Розраховуємо чисельні значення функцій приналежності:

$$G_{11} = 1 - \frac{1}{1 - 3.66 \cdot 10^{-12} \cdot (473 - 378)^{5.87}} = 0.48;$$

$$F_{12} = \frac{1}{1 + 8.93 \cdot 10^{-6} \cdot (413 - 343)^{2.41}} = 0.80.$$

Користуючись правилом 2, ми змушені вибрати ті ж самі два потоки. Розрахунок досягнутих температур показує, що гарячий потік при цьому буде недоохолоджений на 70 K.

Значення функцій приналежності:

$$G_{21} = 0.55; \quad F_{22} = 0.001; \quad F_{23} = 1.$$

За правилом 3 вибираємо для теплообміну холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою:

$$\begin{aligned} 343 &\leftarrow 473 \quad (433) \\ 293 &\rightarrow 393. \end{aligned}$$

Розрахунок досягнутих температур показує, що гарячий потік при цьому буде нагрітий на 30 К.

Значення функції приналежності:

$$G_{31} = 0.43; \quad F_{32} = 0.025; \quad F_{33} = 1.$$

Використовуючи нечіткий алгоритм синтезу теплообмінної системи, знаходимо:

$$\begin{aligned} F_1 &= \min (0.48 ; 0.8) = 0.48 ; \\ F_2 &= \min (0.55 ; 0.001 ; 1) = 0.001 ; \\ F_3 &= \min (0.43 ; 0.025 ; 1) = 0.025. \end{aligned}$$

$$P = \max(0.48; 0.001; 0.025) = 0.48.$$

Цьому значенню P відповідає варіант теплообміну за правилом 1 (рис. 4.1).

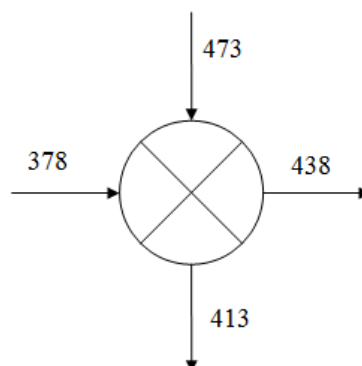


Рис. 4.1. Перший етап синтезу теплової системи

Другий етап синтезу теплової системи

Вихідні потоки перед другим етапом синтезу показано на рис. 4.2.

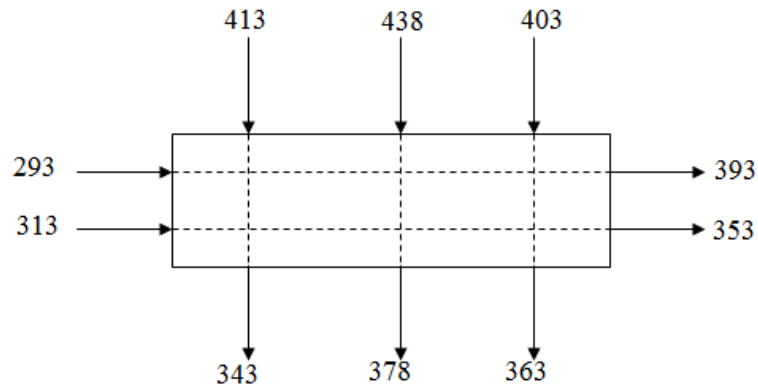


Рис. 4.2. Вихідні потоки теплообмінної системи
перед другим етапом синтезу

Користуючись правилом 1, отримуємо схему теплообміну:

$$(410.6) \quad 378 \leftarrow 438, \\ 313 \rightarrow 353.$$

Розраховуємо чисельні значення функцій приналежності:

$$G_{11} = 0.8; \quad F_{12} = 0.9.$$

Користуючись правилом 2, схема теплообміну має вигляд:

$$378 \leftarrow 438, \\ (333) \quad 293 \rightarrow 393.$$

Значення функцій приналежності:

$$G_{21} = 0.40; \quad F_{22} = 1; \quad F_{23} = 0.005.$$

За правилом 3 вибираємо для теплообміну холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою:

$$343 \leftarrow 413, \\ 293 \rightarrow 393 \quad (363).$$

Значення функції приналежності:

$$G_{31} = 0.43; \quad G_{32} = 1; \quad G_{33} = 0.025.$$

$$F_1 = 0.8; \quad F_2 = 0.005; \quad F_3 = 0.025.$$

$$P = 0.8.$$

Цьому значенню P відповідає варіант теплообміну за правилом 1 (рис. 4.3).

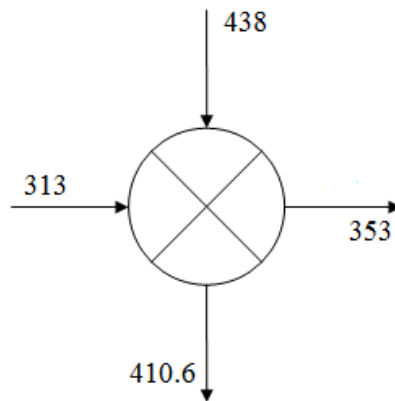


Рис. 4.3. Другий етап синтезу теплової системи

Третій етап синтезу теплової системи

Вихідні потоки перед третім етапом синтезу показано на рис. 4.4.

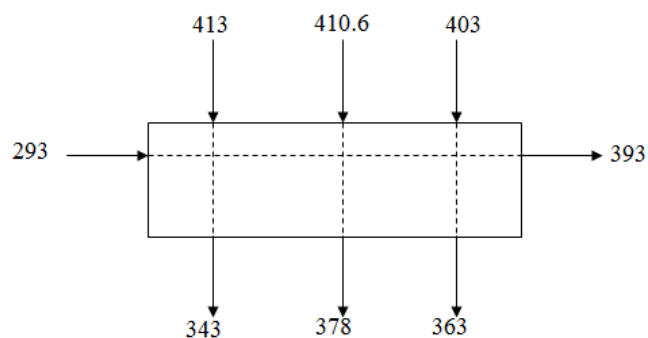


Рис. 4.4. Вихідні потоки теплообмінної системи перед третім етапом синтезу

Користуючись правилом 1, отримуємо схему теплообміну:

$$\begin{array}{l} 343 \leftarrow 413, \\ 283 \rightarrow 393 \quad (363). \end{array}$$

Розраховуємо чисельні значення функцій приналежності:

$$G_{11} = 0.86; \quad F_{12} = 0.8.$$

Користуючись правилом 2, схема теплообміну має вигляд:

$$\begin{array}{l} 343 \leftarrow 413, \\ (323) \quad 293 \rightarrow 393. \end{array}$$

Значення функцій приналежності:

$$G_{21} = 0.30; \quad F_{22} = 1; \quad F_{23} = 0.025.$$

За правилом 3 вибираємо для теплообміну холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою:

$$\begin{array}{l} 343 \leftarrow 413, \\ 293 \rightarrow 393 \quad (363). \end{array}$$

Розрахунок досягнутих температур показує, що гарячий потік при цьому буде нагрітий на 30 К.

Значення функції приналежності:

$$G_{31} = 0.3; \quad G_{32} = 1; \quad G_{33} = 0.025.$$

$$F_1 = 0.8; \quad F_2 = 0.025; \quad F_3 = 0.025.$$

$$P = 0.8.$$

Цьому значенню P відповідає варіант теплообміну за правилом 1 (рис. 4.5).

Четвертий етап синтезу теплової системи

Вихідні потоки перед четвертим етапом синтезу показано на рис. 4.6.

Застосування перших і других правил приведе до одній і тій же схемі теплообміну. Теплообмін за третім правилом не можливий, тому що $\Delta T < 20 \text{ K}$.

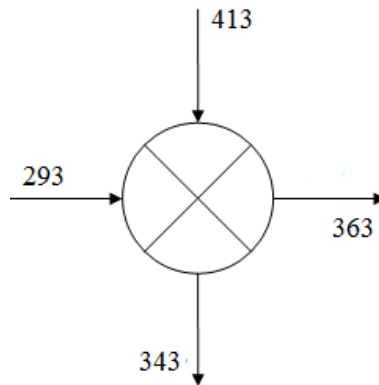


Рис. 4.5. Третій етап синтезу теплової системи:

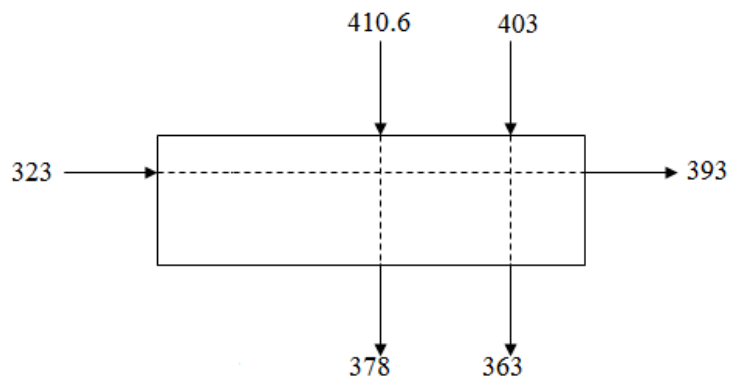


Рис. 4.6. Вихідні потоки теплообмінної системи
перед четвертим етапом синтезу

Результати четвертого етапу синтезу теплової системи показано на рис.4.7.

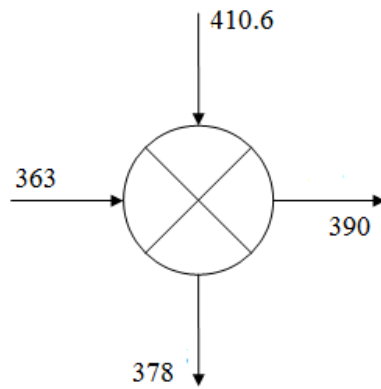


Рис. 4.7. Четвертий етап синтезу теплової системи:

Оптимальна схема теплообміну показана на рис. 4.8.

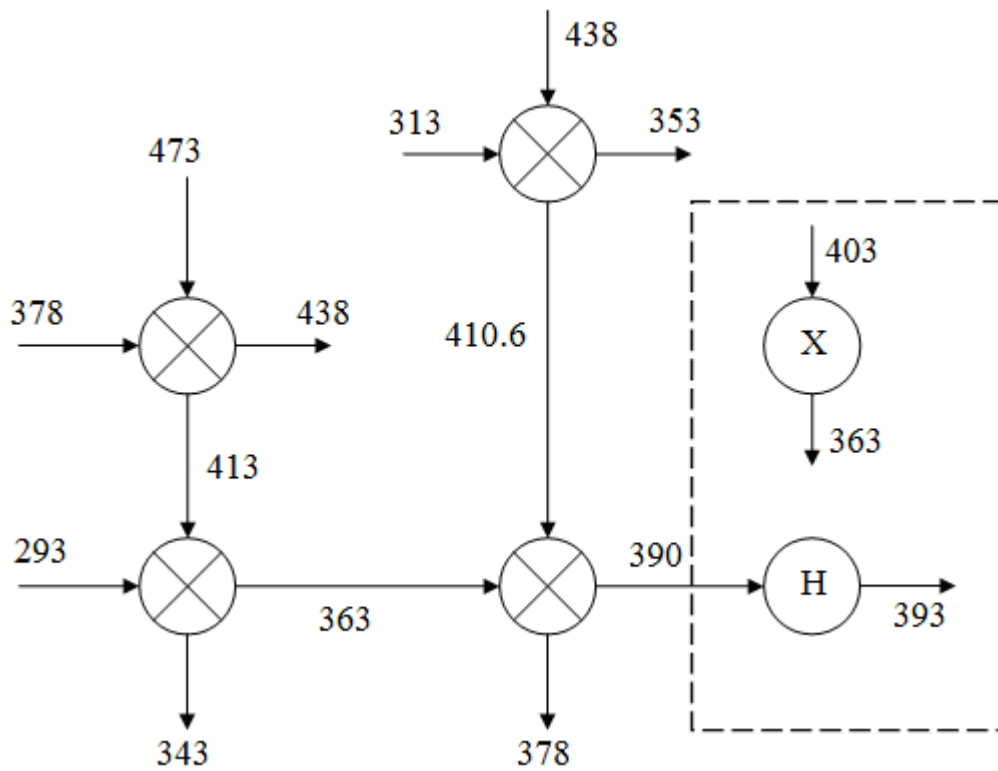


Рис. 4.8. Оптимальна схема теплообміну

4.3. Хід виконання роботи

За наданою викладачем завданням провести аналіз технологічних потоків та синтезувати оптимальну технологічну схему внутрішньої підсистеми. Доповнити цю схему зовнішньою підсистемою. Проаналізувати отримані результати. Отриманий результат відобразити у вигляді оптимальної схеми теплообміну. Всі розрахунки зробити в одному з програмних середовищ: VBA, MathCAD, MATLAB.

4.4. Складання звіту про лабораторну роботу

У звіті потрібно подати тему і мету роботи, індивідуальне завдання за своїм варіантом, короткі теоретичні відомості, хід виконання роботи, аналіз результатів і висновки за результатами виконання роботи.

4.5. Контрольні питання до роботи № 4

1. Постановка задачі синтезу теплообмінної системи.
2. Модулі для розрахунку теплообмінників.
3. Графічне представлення систем теплообмінну.
4. Матричне представлення систем теплообмінну.
5. Аналіз систем теплообміну.
6. Класифікація методів синтезу систем теплообмінну.
7. Евристики для синтезу систем теплообміну.
8. Функції приналежності для нечітких множин.

Лабораторна робота 5

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПІНЧ-АНАЛІЗУ

МЕТА РОБОТИ – освоєння технології побудови мережі теплообмінників, що забезпечує максимальну рекуперацію енергії в хіміко-технологічній системі при заданому значенні ΔT_{\min} .

5.1. Основні теоретичні положення

Тепловий потік характеризують його початкова T_n , °C і кінцева T_k , °C температури, масова витрата G , кг/с теплоносія, теплоємність C_p кДж / (кг·°C). Можна обчислити потокову теплоємність (водяний еквівалент) CP , кВт/°C:

$$CP = G \cdot C_p, \quad (5.1)$$

та зміну ентальпії потоку в його температурному інтервалі (зміна теплоємності технологічного потоку в межах зміни його температури):

$$\Delta H = \int_{T_n}^{T_k} CP \cdot dT. \quad (5.2)$$

Якщо $CP = \text{const}$, то:

$$\Delta H = CP \cdot (T_k - T_n) \quad (5.3)$$

Розглянемо порядок побудови мережі теплообмінників на прикладі. Початкові дані представлені в табл. 5.1.

Будуємо температурно – ентальпійну діаграму (рис. 5.1):

$$\Delta H_1 = CP_1 \cdot (T_k - T_n) = 1,5(400 - 150) = 375$$

$$\Delta H_2 = 1,3(300 - 110) = 247$$

$$\Delta H_3 = 1,0(410 - 120) = 290$$

$$\Delta H_4 = 2,0(340 - 110) = 460$$

Таблиця 5.1. Параметри стану технологічних потоків

| Потоки | Температура, °С | | Водяний еквівалент, кВт / °С |
|----------|-----------------|---------|---------------------------------|
| | початкова | кінцева | |
| Холодний | 150 | 400 | 1,5 |
| Холодний | 110 | 300 | 1,3 |
| Гарячий | 410 | 120 | 1,0 |
| Гарячий | 340 | 110 | 2,0 |



Рис. 5.1. Температурно - ентальпійна діаграма теплових потоків

Для побудови складеної кривої для потоків, що охолоджуються («гарячої» складеної кривої), розташуємо початкові та кінцеві температури

гарячих потоків за зростанням та розіб'ємо їх на інтервали та визначимо їх довжини. Отже:

1. (110 120), довжина інтервалу = 10;
2. (120 340), довжина інтервалу = 220;
3. (340 410), довжина інтервалу = 70.

Просумуємо для кожного інтервалу значення потокових теплоємкостей, температурні межі яких включає даний інтервал:

$$CP_{H1} = CP_4 = 2,0$$

$$CP_{H2} = CP_3 + CP_4 = 2,0 + 1,0 = 3,0$$

$$CP_{H3} = CP_3 = 1,0$$

Використовуючи співвідношення (5.3), розраховуємо ΔH_H :

$$\Delta H_{H1} = CP_{H1} \cdot \Delta T_{H1} = 2,0 \cdot 10 = 20$$

$$\Delta H_{H2} = CP_{H2} \cdot \Delta T_{H2} = 3,0 \cdot 220 = 660$$

$$\Delta H_{H3} = CP_{H3} \cdot \Delta T_{H3} = 1,0 \cdot 70 = 70$$

Повторюємо процедуру для побудови «холодної» складеної кривої. Отже, інтервали:

1. (110 150), довжина інтервалу = 40;
2. (150 300), довжина інтервалу = 150;
3. (300 400), довжина інтервалу = 100.

Значення потокових теплоємкостей:

$$CP_{H1} = CP_4 = 2,0$$

$$CP_{H2} = CP_3 + CP_4 = 2,0 + 1,0 = 3,0$$

$$CP_{H3} = CP_3 = 1,0$$

Значення ΔH_H :

$$\Delta H_{H1} = CP_{H1} \cdot \Delta T_{H1} = 2,0 \cdot 10 = 20$$

$$\Delta H_{H2} = CP_{H2} \cdot \Delta T_{H2} = 3,0 \cdot 220 = 660$$

$$\Delta H_{H3} = CP_{H3} \cdot \Delta T_{H3} = 1,0 \cdot 70 = 70$$

Після виконання розрахунків, будуємо «гарячу» та «холодну» складені криві (рис. 5.2).

При проектуванні мереж теплообмінників можна задати необхідну величину ΔT_{\min} таким чином, щоб мінімальна температурна різниця кожного теплообмінника мережі не перевищувала ΔT_{\min} . Для прикладу, що розглядається, задамося $\Delta T_{\min} = 20$. Розташуємо «гарячу» та «холодну» складені криві таким чином, щоб відстань між ними по осі T було не менше за $\Delta T_{\min} = 20$ (рис. 5.3).

При цьому відстань на вісі H між складеними кривими на «гарячому» та «холодному» кінцях відповідає мінімальній кількості енергії, що необхідно для нагріву та охолодження системи. Точка, в якій відстань між складеними кривими дорівнює ΔT_{\min} називається «точкою пінча».

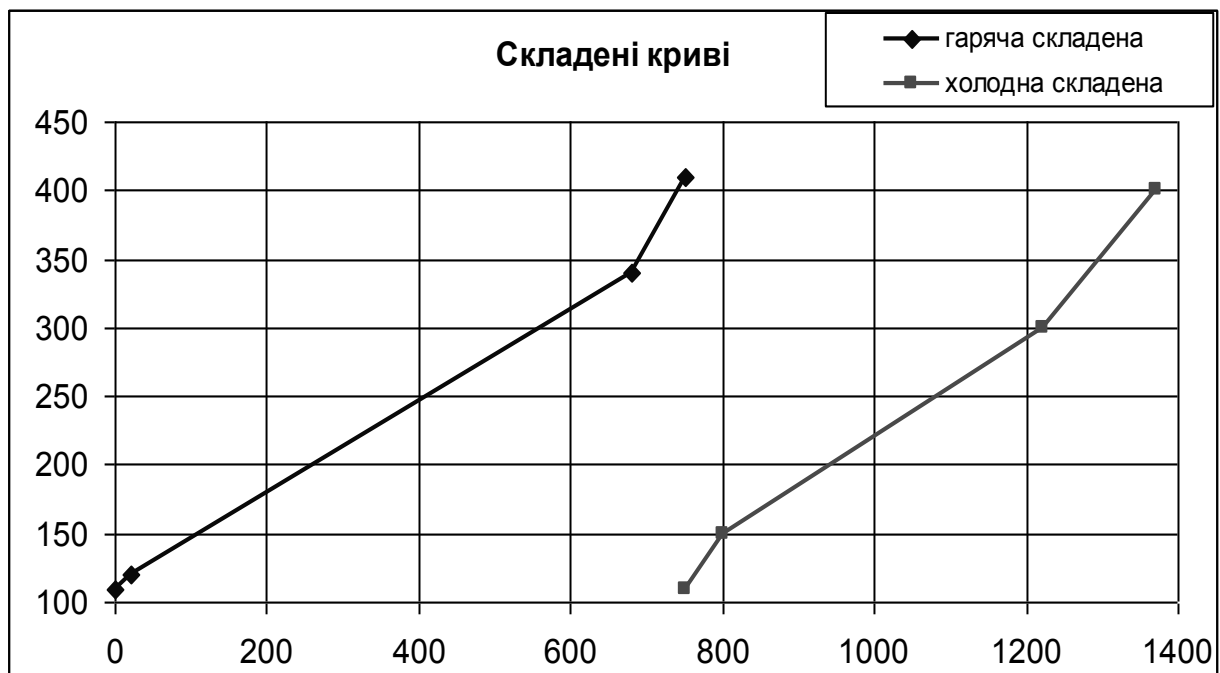


Рис. 5.2. Складові криві

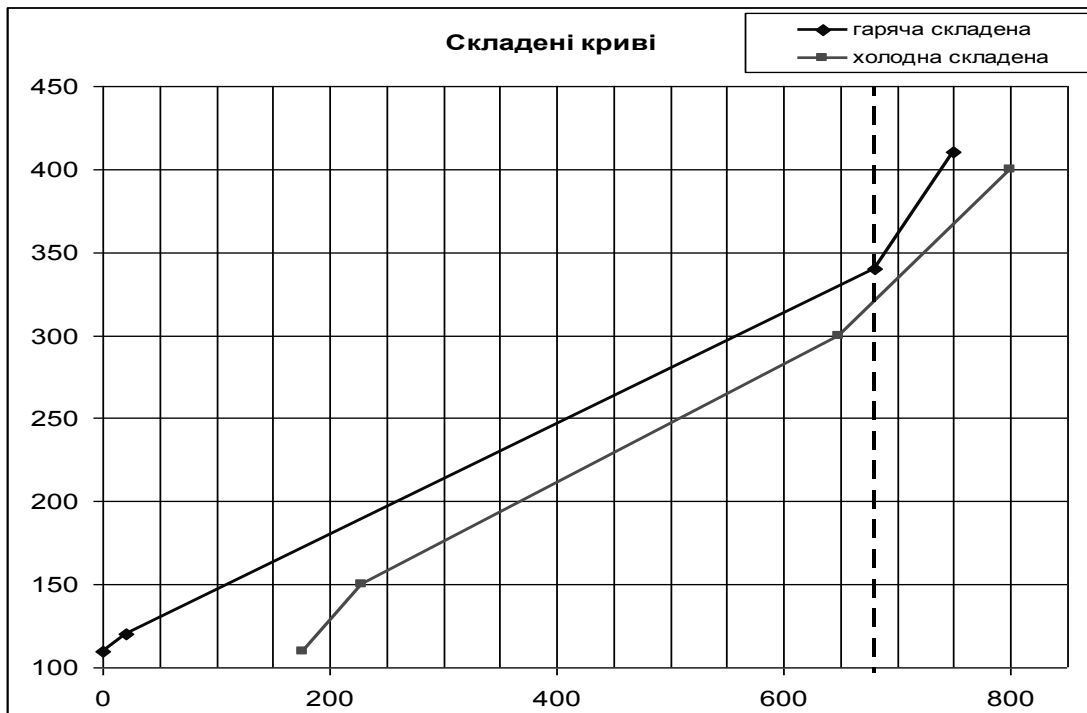


Рис. 5.3. Зсув складових кривих для $\Delta T_{\min}=20$

Температури у точці Пінча для $\Delta T_{\min}=20$ складають:

- Для «гарячої» кривої 340°C ;
- Для «холодної» кривої 320°C .

Вибір значення ΔT_{\min} базується на компромісі між капітальними витратами та витратами на додаткову енергію, що знадобиться для функціонування системи, тобто є задачею оптимізації з обмеженнями.

Для обраного значення ΔT_{\min} можна визначити мінімальне значення додаткової енергії для нагріву та охолодження потоків системи та побудувати сіткову діаграму потоків, використання якої значно полегшує побудову мережі теплообмінників.

Для потоків з прикладу, що розглядається, сіткова діаграма має вигляд (рис. 5.4).

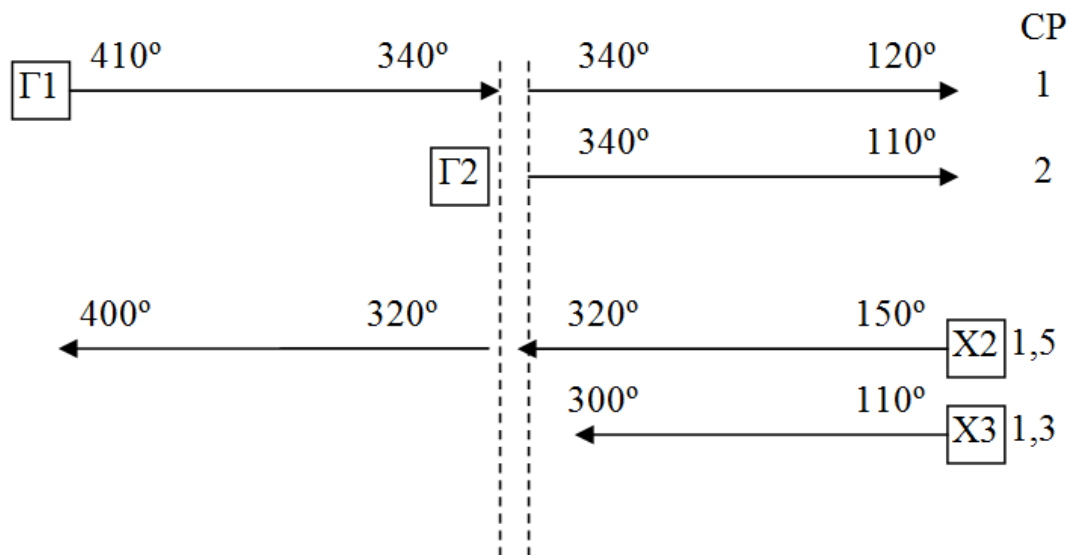


Рис. 5.4. Сіткова діаграма потоків теплообмінної системи

Проектування мережі теплообмінників з максимальною рекуперацією енергії для заданого значення ΔT_{\min}

Правила проектування мережі теплообмінників, що забезпечує максимальну рекуперацію енергії при за даному значенні ΔT_{\min} :

1. Розбити початкову систему потоків на дві підсистеми – потоки, що знаходяться вище за точку пінча, і потоки, що знаходяться нижче за точку пінча.

2. Проводити розміщення теплообмінників в підсистемах не залежно одна від одної, рухаючись від точки пінча.

3. Починати з потоків, що входять в область пінча і мають найбільше значення потокової теплоємності.

4. В області пінча при установці зв'язку дотримуватися правила

$$C_{p \text{ вих. потоку}} \geq C_{p \text{ вх. потоку}}$$

5. Робити максимальним навантаження теплообмінника, що зв'язує кожну пару потоків. Відзначати галочкою потоки, вимоги по енергії яких задоволені.

6. Визначити кількість енергії допоміжного енергоносія, коли всі можливості рекуперації в підсистемі вичерпані.

Відповідні сітчасті діаграми (рис 5.5 а, б):

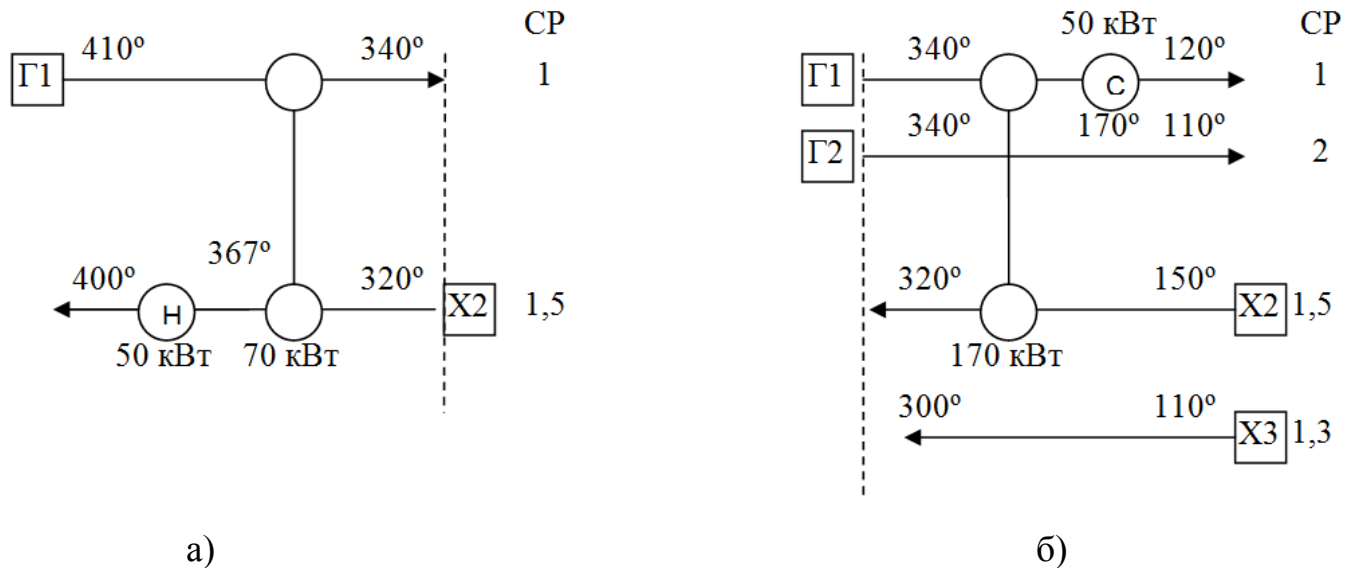


Рис. 5.5. Сітчаста діаграма

а) вище точки пінча; б) нижче точки пінча

Далі будується оптимальна схема теплообміну, що буде відповідати вимогам максимуму рекуперації енергії.

5.2. Хід виконання роботи

1. Вивчити представлення теплових потоків процесу у вигляді складених кривих.
2. Вивчити методику побудови мережі теплообмінників з максимальною рекуперацією тепла при заданому значенні.
3. Для заданих викладачем теплових потоків побудувати складені криві; визначити точку пінча; визначити кількість тепла в одиницю часу, яка потрібна для нагрівання і охолодження потоків за допомогою допоміжних енергоносіїв, - $Q_{H\min}$, $Q_{C\min}$ при різних

значеннях ΔT_{\min} ; побудувати сіткову діаграму потоків процесу при заданому ΔT_{\min} .

4. Використовуючи сіткову діаграму, розробити мережу теплообмінників, що забезпечує максимальну рекуперацію енергії.

5.3. Складання звіту про лабораторну роботу

У звіті потрібно подати тему і мету роботи, індивідуальне завдання за своїм варіантом, короткі теоретичні відомості, хід виконання роботи, аналіз результатів і висновки за результатами виконання роботи. Всі розрахунки зробити в одному з програмних середовищ: VBA, MathCAD, MATLAB.

5.4. Контрольні питання до роботи № 5

1. Постановка задачі синтезу теплообмінної системи.
2. Модулі для розрахунку теплообмінників.
3. Аналіз систем теплообміну.
4. Класифікація методів синтезу систем теплообміну.
5. Тепломісткість теплового потоку.
6. Температурно - ентальпійна діаграма теплового потоку.
7. Правіла побудови пінч-діаграми.
8. Мінімальна різниця температур теплоносіїв в системі теплообміну.
Точка пінча.
9. Побудова складових кривих теплових потоків системи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АДСОРБЦІЙНОЇ ОЧИСТКИ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

Мета роботи – виробити у студентів уміння визначати адсорбційну ємність адсорбенту відносно деякого адсорбату.

6.1. Основні теоретичні положення

Перспективними за ефективністю та техніко-економічними показниками є адсорбційні методи очистки газів. Методи адсорбції газів твердими сорбентами дозволяють здійснити тонке очищення газу від шкідливих газів, а також одержати концентровані оксиди азоту шляхом десорбції їх з сорбенту ізольованим теплоносієм. Адсорбційні методи застосовують для різних технологічних цілей — розділення парогазових сумішей на компоненти з виділенням фракцій, осушення газів і для санітарного очищення газових вихлопів. Останнім часом адсорбційні методи виходять на перший план як надійний засіб захисту атмосфери від токсичних газоподібних речовин, що забезпечує можливість концентрування і утилізації цих речовин.

Адсорбційні методи засновані на вибіркового виділенні з парогазової суміші певних компонентів за допомогою адсорбентів — твердих високопористих матеріалів, що володіють розвиненою питомою поверхнею $S_{\text{пит}}$ ($S_{\text{пит}}$ — відношення поверхні до маси, $\text{м}^2/\text{г}$). Адсорбцію газових домішок звичайно ведуть в поличних реакторах періодичної дії без теплообмінних пристроїв; адсорбент розташовують на полках реактора. Коли необхідний теплообмін (наприклад, потрібно одержати при регенерації десорбат в концентрованому вигляді), використовують адсорбери з вбудованими теплообмінними елементами або виконують

реактор у вигляді трубчастих теплообмінників; адсорбент засипаний в трубки, а в міжтрубному просторі циркулює теплоносії. Адсорбція є важливим тепловим процесом поділу, який використовується в хімічній і інших подібних галузях промисловості, але також все частіше використовується в екологічних технологіях. Адсорбція в області природоохоронної інженерії (на додаток до очистки стічних вод, застосовують для очистки газів), в випадку коли концентрація домішок у вихлопних газах низька, або якщо газ може бути повернений у систему.

Інформації про перебіг адсорбції так само мало, як і про процеси вилучення газів шляхом екстракції або ректифікації. Особливо важливо набути досвіду в визначенні адсорбційної ємності адсорбенту відносно деякого адсорбату. Адсорбційна здатність адсорбенту залежить від фізичних і хімічних властивостей адсорбату та адсорбенту. У технологічних процесах все частіше застосовується динамічна адсорбція, тобто газова суміш повинна неперевно розділятися.

Термін дії адсорбенту завершується після того як концентрація адсорбату на вході наближається до 0 на виході з адсорберу (рис. 6.1.).

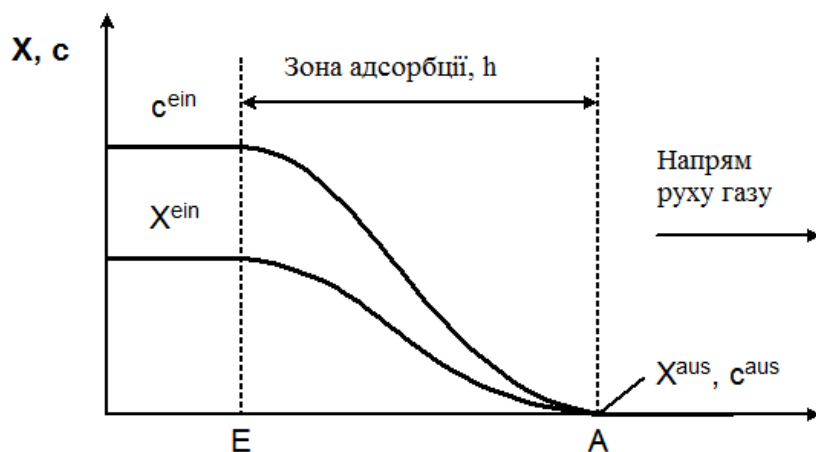


Рис.6.1. Залежність концентрації та відносної маси адсорбату в газовій фазі

Адсорбент рухається до виходу з адсорбера і коли досягає точки кінця шару адсорбенту здійснюють виміри величин. Час, в який вперше виявлено адсорбат називають часом-проривом (t_D , рис.6.2.). Концентрація адсорбату в адсорбенті приймає все більше значення і кінцево досягає вхідної концентрації c_{ein} ($c/c_{ein}=1$).

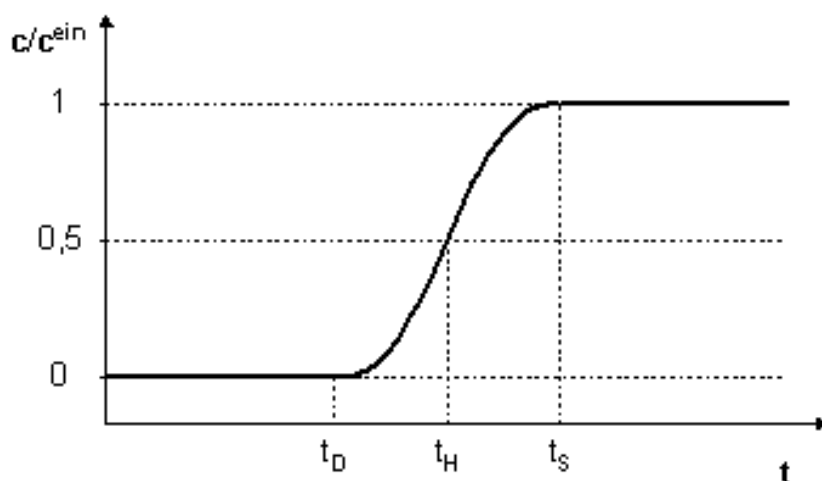


Рис.6.2. Характеристична крива зміни концентрації газу в адсорбенті до вхідної концентрації з часом

Довжину адсорбційної зони визначають за формулою:

$$L = h \left(1 - \frac{X_D}{X_S} \right) \quad (6.1)$$

де h – висота адсорбційної зони, X_D – поглинута маса на момент прориву фронту адсорбції, X_S – поглинута маса на момент насичення шару адсорбенту.

$$X_D = \frac{\dot{m}}{m_{ad}} t_D \quad (6.2)$$

де \dot{m} – масовий потік адсорбату в адсорбенті, m_{ad} – маса адсорбенту, t_D – час прориву фронту адсорбції.

X_S можна аналогічно визначити за часом насичення (t_S), враховуючи ту масу адсорбату який буде адсорбований з моменту прориву фронту адсорбції.

$$X_S = \frac{\dot{m}}{m_{ad}} \left(t_S - \sum_0^{t_S} \frac{c}{c_{ein}} dt \right) \quad (6.3)$$

На рисунку 6.3 схематично зображено дослідну установку.

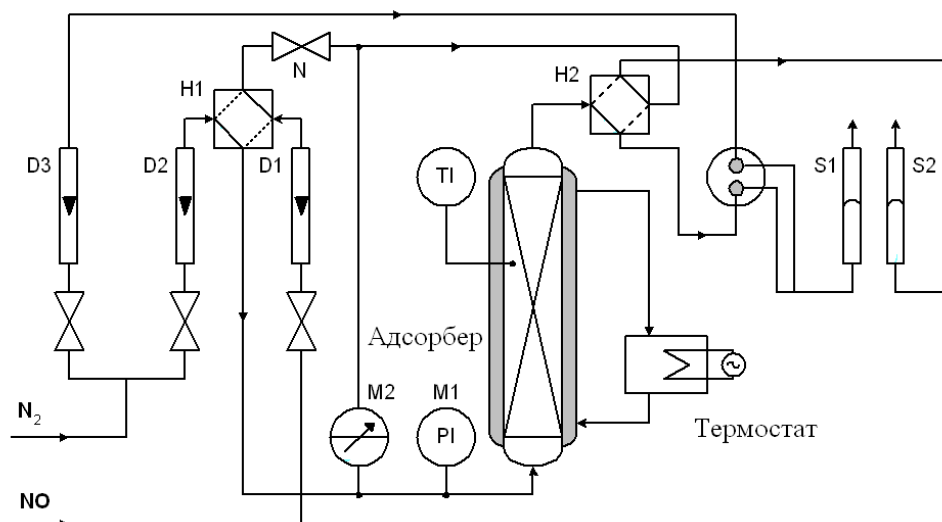


Рис. 6.3. Схематичне зображення дослідного устаткування:

D1, D2, D3 – витратоміри; S1, S2 – вимірювачі витрати потоку мильних пазирів; H1, H2 – крани; TI – термopapa; M1, M2 – манометри; N - голчастий вентиль.

Головною характеристикою адсорбційного матеріалу, є його адсорбційна ємність відносно конкретного адсорбату, за показаннями якої можна розрахувати необхідну кількість адсорбенту для ліквідування того чи іншого викиду. Так масу адсорбованого окислу слід визначати за формулою:

$$m_{ad} = \frac{FP_0M_N}{RT_k} \int_{t_{tot}}^{t_s} \Delta C dt, \quad (6.4)$$

де $t_{tot} = \frac{V_{tot} \cdot P_{ads} \cdot T_k}{F \cdot P_0 \cdot T_{ads}}$ - час простою, год; t_s - час насичення

адсорбенту, год; F - витрата газу, м³/год; M_N - молярна маса деякого газу, г/моль; T_k - температура навколишнього середовища, К; T_{ads} -

температура адсорбенту, К; ΔC - зміна концентрації; V_{tot} - об'єм апаратури, м³ (50 мл), P_0 , P_{ads} - нормальний тиск і тиск на адсорбенті, Па.

6.2. Хід виконання роботи

За наданою викладачем індивідуальним завданням провести розрахунки та побудувати відповідні характеристичні криві. Розрахунки зробити в одному з програмних середовищ MathCAD, MATLAB, VisualBasic .

1. Через криві адсорбції необхідно визначити час прориву фронту адсорбції та час насичення (t_D, t_s), з метою визначення адсорбованої кількості прориву фронту адсорбції та насичення (X_D, X_S).
2. Визначення часу простою апаратури (t_{tot}) та масової витрати адсорбату (\dot{m}):

$$t_{tot} = \frac{V_{tot} \cdot P_{ads} \cdot T_k}{F \cdot P_0 \cdot T_{ads}},$$

$$\dot{m} = \frac{FP_0M_N}{RT_k} y,$$

де t_s - час насичення адсорбенту, год; F - витрата газу, м³/год; M_N - молярна маса деякого газу, г/моль; T_k - температура навколишнього середовища, К; T_{ads} - температура адсорбенту, К; y - вміст газу в потоці; V_{tot} - об'єм апаратури, м³ (50 мл); P_0 , P_{ads} - нормальний тиск і тиск в адсорбенті, Па.

3. Визначення адсорбованої кількості на момент насичення, X_s . Для симетричних адсорбційних кривих розрахункова формула матиме вигляд:

$$X_s = \frac{\dot{m}}{m_{ad}} t_s - \frac{\dot{m}}{m_{ad}} \cdot \frac{t_s - t_D}{2},$$

в іншому випадку за формулою 6.3

4. Розрахувати поглинену масу по всій адсорбційній зоні:

$$L = h \frac{t_s - t_D}{t - (1 + F)(t_s - t_D)},$$

$$F = \frac{F_2}{F_2 + F_1}$$

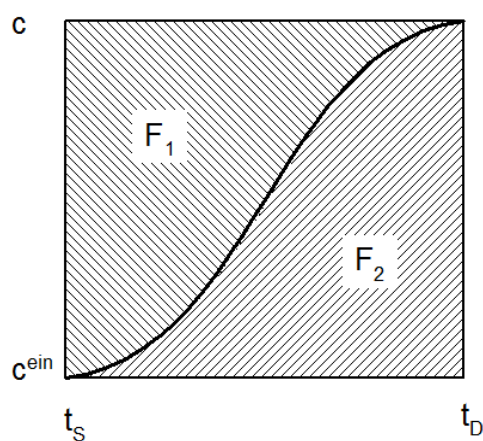


Рис. 6.4. Інтегральна крива насичена

6.3. Складання звіту про лабораторну роботу

У звіті потрібно подати тему і мету роботи, індивідуальне завдання за своїм варіантом, короткі теоретичні відомості, хід виконання роботи, аналіз результатів і висновки за результатами виконання роботи.

6.4. Контрольні питання до роботи № 6

1. Дати визначення поняттю адсорбції. Пояснити різницю між фізичною та хімічною адсорбцією.
2. Навести основні теорії адсорбції та їх математичний опис.
3. Проаналізувати розрахунок адсорбційної ємності типових хімічних процесів.
4. Дати оцінку розрахунку адсорбційно/десорбційного об'єму графічно та аналітично.
5. Розкрити поняття “прорив адсорбційного фронту”.
6. Навести приклади замкнених ХТС на стадії очищення/доочищення.

Список рекомендованой литературы

1. Кафаров, В.В. Принципы создания безотходных химических производств [Текст] / В.В. Кафаров. - М.: Химия, 1982. – 288с.
2. Кафаров, В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем [Текст] / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.П. Мешалкин. - М.: Химия, 1974. – 344с.
3. Кафаров, В.В. Основы автоматизированного проектирования химических производств [Текст] / В.В. Кафаров, В.Н. Ветехин. - М.: Наука, 1987. – 624с.
4. Кафаров, В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем [Текст] / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. - М.: Химия, 1991. – 432с.
5. Химико-технологические системы. Синтез, оптимизация, управление [Текст] / под ред. И.П. Мухленова - Л.: Химия, 1986. – 424с.
6. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие [Текст] / под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. – Ин-т технической теплофизики. - К.: Наук. думка, 1991. – 360с.
7. Сажин, Б.С. Эксергетический метод в химической технологии [Текст] / Б.С. Сажин, А.П. Булеков. - М.: Химия, 1992. – 208с.
8. Лейтес, И.Л. Теория и практика химической энерготехнологии [Текст] / И.Л. Лейтес, М.Х. Сосна, В.П.Семенов. - М.: Химия, 1988. – 280с.
9. Товажнянский, Л.Л. Энерготехнология химико-технологических производств [Текст] / Л.Л. Товажнянский. - Харьков, 1998. - 84.
10. Основы интеграции тепловых процессов [Текст] / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустянка, Л.М. Ульв ; под общ. ред. Л.Л. Товажнянского – Х.: НТУ "ХПИ", 2000. – 456.с.