

Л.М. УЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП»;

А.О. ГАРЄВ, асистент, НТУ «ХП»;

А.М. МИРОНОВ, студент, НТУ «ХП»

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ТАБЛИЧНОГО АЛГОРИТМУ «КАСКАД» ТА РОБОТА З СІТКОВОЮ ДІАГРАМОЮ

Завдання цієї роботи – зробити огляд методології користування основними методами теплової інтеграції процесів («Каскад») та пінч-аналізу (сіткова діаграма), а також дослідити коректне використання екстрагованих вихідних даних безвідносно до технологічної схеми, знаючи задану лише мінімальну різницю температур.

Ключові слова: інтеграція процесів, пінч-аналіз, «Каскад», сіткова діаграма.

Постановка проблеми. Використання ЕОМ для розрахунку великих технологічних систем, які включають колони, теплообмінники, інше допоміжне устаткування, дозволяє прорахувати два або декілька варіантів з подальшим вибором найкращого як на стадії проектування, так і на стадії реконструкції. Проте невеликі установки можуть бути легко обчислені вручну за допомогою базових методів пінч-інтеграції хіміко-технологічних процесів.

Аби уникнути недоліків і труднощів, а також досягти бажаного результату при синтезі оптимальної структури ХТС необхідно використовувати методи, що володіють наступними специфічними властивостями: можливість знаходження альтернативних структур в районі оптимуму, мінімальний об'єм необхідної інформації, можливість обліку якісно різних вимог до властивостей синтезуючих ХТС, здобуття простих структур, можливість діалогу між проектувальником і обчислювальною машиною, можливість легкого внесення особистого досвіду проектувальника в алгоритм, застосування до вирішення великих промислових завдань [1]. У випадку безпосереднього прямого розрахунку подібної системи власне людиною, кількість таких суперечливостей різко зменшиться.

© Л.М. Ульєв, А.О. Гарєв, А.М. Миронов. 2014

Актуальність і доцільність роботи. Оскільки людина має покладатися не тільки на машинну працю, але й на власний мозок, є доцільним розглянути простий та ефективний метод покрокової побудови сіткової діаграми через розрахунок «каскаду».

Такі обчислення безумовно будуть коректними, навіть незважаючи на те, що при цьому власне технологічний процес не є нам відомим. Сам метод буде корисним як студентам-технологам, так і сторонній зацікавленій особі.

Метод проектування, що володіє вказаними властивостями, з'явився на Заході під час енергетичної кризи середини 70-х років та особливо інтенсивно розвивається останні два-три десятиріччя. Відомий він під назвою пінч-аналізу.

Завдяки розробці теорій інтеграції теплових процесів і методів пінч-аналізу, які дозволяють на базі основних термодинамічних принципів визначити граничні можливі норми споживання тепла від зовнішніх джерел і потреби в охолодженні, а потім створити оптимальну структуру і розрахувати оптимальні параметри теплообмінної мережі, був досягнутий значний прогрес в вирішенні багатьох задач проектування і модернізації ХТС усіх сфер застосування [2].

Ціль роботи. Огляд можливих правил розміщення теплообмінників на сітковій діаграмі, з використанням методу табличного алгоритму «Каскад».

Розгляд необхідних даних. Задля наочності демонстрації можливостей методу, що розглядається, задамося мінімальними вхідними даними.

Уявімо собі, що за результатами аналізу схеми хіміко-технологічного процесу були розраховані матеріальний і тепловий баланс для всіх потоків установки.

Відомі значення цільової температури, температури постачання, величини теплових навантажень на холодні («хол.») та гарячі («гар.») потоки та їхні потокові теплоємності. Потім задля нашого комфорту ці дані зведено в потокову таблицю 1, яка, власне, і дійшла до нас.

Безумовна об'єктивність результатів зумовлена тим, що усі подальші розрахунки будуть наведені, абстрагуючись від будь-яких конкретних хіміко-технологічних процесів.

Таблиця 1. Потоківі дані технологічної схеми

| № потоку | Тип потоку | Температура постачання, T_s , °C | Цільова температура, T_T , °C | Теплова потужність, Q , кВт | Потокова теплоємність, CP , кВт/°C |
|----------|------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Гар. | 98 | 30 | 201,137 | 2,9579 |
| 2 | Гар. | 100 | 30 | 776,503 | 11,0929 |
| 3 | Гар. | 98 | 98 | 899,264 | 899,264 |
| 4 | Хол. | 30 | 98,6 | 963,8984 | 14,051 |
| 5 | Хол. | 10 | 80 | 776,503 | 11,0929 |

Розв'язання проблеми. Нам відомо, що у існуючому процесі рекуперація відсутня. Для того, щоб вона з'явилася, скористаємося методом табличного алгоритму, або «каскадом».

Маючи задану мінімальну різницю температур $\Delta T_{\min} = 4^\circ\text{C}$, почнемо обчислювати цільові енергетичні значення.

Алгоритм складається з:

- визначення величин навантаження на утилітні теплообмінники;
- визначення локалізації пінча;
- розгляду підсистем вище та нижче пінча;
- висновків.

Послідовне виконання всіх цих етапів забезпечить логічне перетікання «каскадного» методу у закінчену сіткову діаграму із зазначенням усіх розглянутих елементів [3].

Для цього спочатку визначимо зрушені температурні інтервали з реальних температур постачання й цільових температур технологічних потоків процесу.

Необхідно всі гарячі потоки зрушити по температурній осі вниз на $\Delta T_{\min}/2$ (гаряча складова крива на $\Delta T_{\min}/2$ холодніше, ніж у дійсності), а холодні потоки підніmemo на $\Delta T_{\min}/2$ (холодна складова крива на $\Delta T_{\min}/2$ гарячіше, ніж насправді).

Побудуємо спеціальну таблицю (табл. 2), де запишемо реальні й зрушені температури.

Таблиця 2. Зрушені температури потоків

| Потік | Тип | $T_s, ^\circ\text{C}$ | $T_T, ^\circ\text{C}$ | $T^*_s, ^\circ\text{C}$ | $T^*_T, ^\circ\text{C}$ |
|-------|------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | Гар. | 98 | 30 | 96 | 28 |
| 2 | Гар. | 100 | 30 | 98 | 28 |
| 3 | Гар. | 98 | 97 | 96 | 95 |
| 4 | Хол. | 30 | 98,6 | 32 | 100,6 |
| 5 | Хол. | 10 | 80 | 12 | 82 |

Зрушені складові криві зараз стикаються в точці пінча. Холодна та гаряча температури пінча також змінилися на $\Delta T_{\min}/2$, і зараз мають одне й теж значення.

У результаті такого зрушення стає можлива передача тепла між потоками у межах кожного температурного інтервалу. Дуже важливо відзначити, що вертикальне переміщення кривих не змінює величини основних ентальпійних інтервалів.

Розташовуємо зрушені температурні інтервали й технологічні потоки уздовж у порядку зменшення. Це буде виглядати наступним чином, $^\circ\text{C}$:

$$100,6 - 98 - 96 - 95 - 82 - 32 - 28 - 12.$$

Як бачимо, в нас сім температурних інтервалів.

Визначмо значення ΔT_i для кожного інтервалу та його ентальпійний баланс:

$$\Delta H_i = (\sum^n_i CP_{Ci} - \sum^n_i CP_{Hi})_i \cdot \Delta T_i,$$

де ΔH_i – тепловий баланс для i -го зрушеного інтервалу, кВт;

ΔT_i – величина i -го температурного інтервалу, $^\circ\text{C}$;

CP_{Ci} та CP_{Hi} – потокова теплоємність холодного та гарячих потоків i -го інтервалу, кВт/ $^\circ\text{C}$.

Для кожного з семи зрушених температурних інтервалів обчислимо величину ентальпії (ΔH_i).

Згідно методології, задля полегшення екстрагування даних при побудові теплового каскаду, результати обчислень заносимо в табл. 3.

Таблиця 3. Тепловий баланс у температурних інтервалах

| Номер інтервалу | Температури на межах інтервалів, T , °C | Розподілення потоків | $\Delta T_{\text{інт}}$, °C | $\Sigma C_{pC} - \Sigma C_{pH}$, кВт/°C | $\Delta H_{\text{інт}}$, кВт | Надлишок/нестача |
|-----------------|---|----------------------|------------------------------|--|-------------------------------|------------------|
| 1 | 100,6 °C | | 2,6 | 14,051 | 36,5326 | Нестача |
| 2 | 98 °C | | 2 | 2,9581 | 5,9162 | Нестача |
| 3 | 96 °C | | 1 | -896,3059 | -896,3059 | Надлишок |
| 4 | 95 °C | | 13 | 0,0002 | 0,0026 | Нестача |
| 5 | 82 °C | | 50 | 11,0931 | 554,655 | Нестача |
| 6 | 32 °C | | 4 | -2,9579 | -11,8316 | Надлишок |
| 7 | 28 °C | | 16 | 11,0929 | 177,4864 | Нестача |
| | 12 °C | | | | | |

Розташуємо наші температурні інтервали уздовж температурної шкали, спадаючим донизу каскадом. Користуючись даними таблиці розберемо кожен температурний інтервал окремо.

Спочатку припустимо, що перший температурний інтервал не одержує теплової енергії від зовнішніх енергоджерел – рис. 1.

Перший інтервал має нестачу теплової потужності 36,5326 кВт, що передається наступному інтервалу.

Другий інтервал має нестачу теплової потужності 5,9162 кВт, що зменшується завдяки енергії, отриманій з першого інтервалу до -42,4488 кВт, що й передається третьому температурному інтервалу процесу.

Третій інтервал має надлишок теплової потужності -896,3059 кВт, що збільшує нестачу енергії до 853,8571 кВт, що й передається четвертому температурному інтервалу процесу.

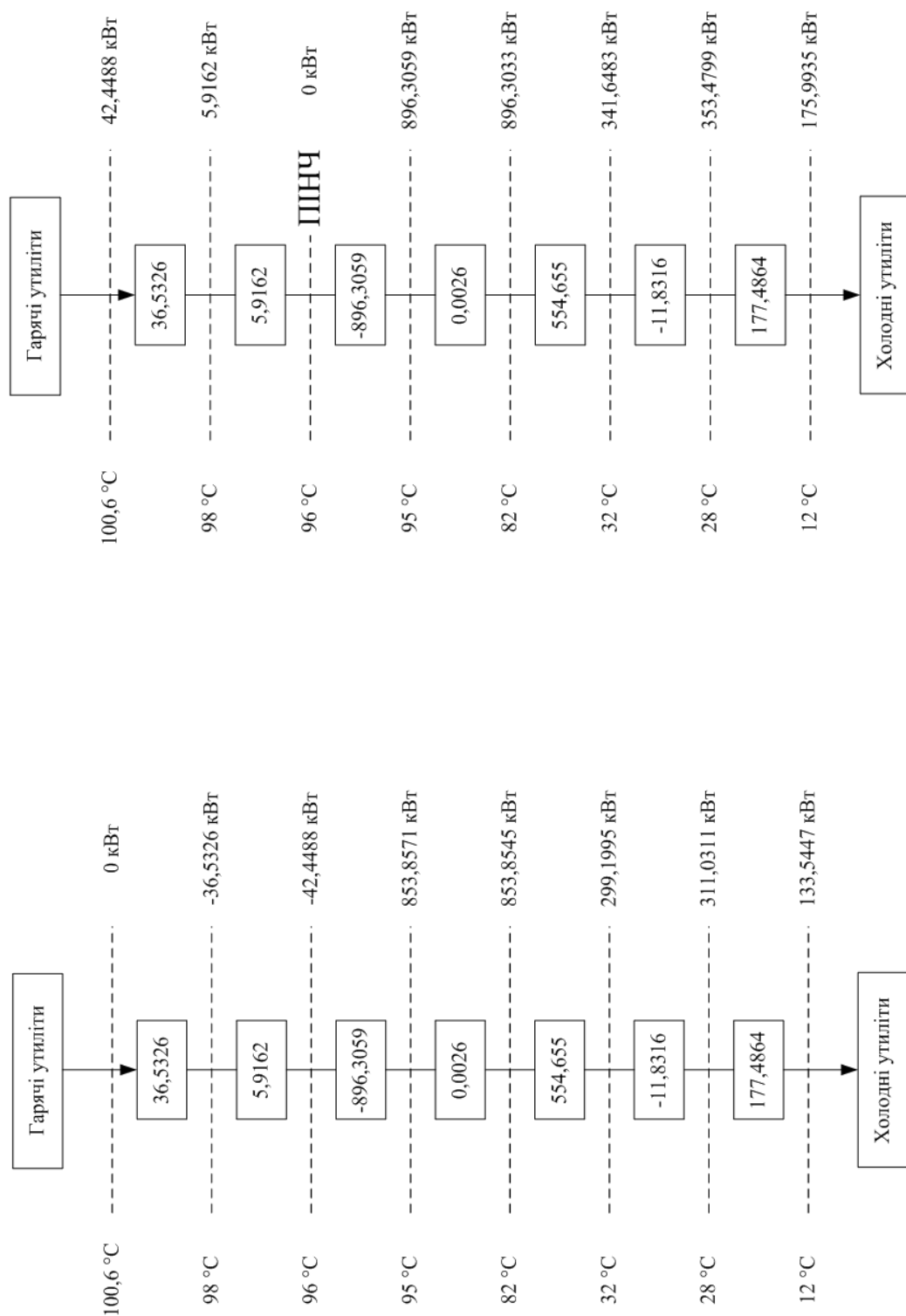


Рис. 1. Тепловий каскад табличного алгоритму при нульових значеннях гарячих утиліт

Рис. 2. Тепловий каскад табличного алгоритму при цільових значеннях гарячих утиліт

Четвертий інтервал має нестачу теплової потужності 0,0026 кВт, що зменшує нестачу енергії до 853,8545 кВт, що й передається четвертому температурному інтервалу процесу.

П'ятий інтервал також має нестачу теплової потужності 554, 655 кВт, що зменшується до 299,1995 кВт, що й передається четвертому температурному інтервалу процесу.

Шостий інтервал теж має надлишок теплової потужності –11,8316 кВт, що збільшує нестачу енергії до 311,0311 кВт, що й передається четвертому температурному інтервалу процесу.

Сьомий інтервал має нестачу теплової енергії 177,4864 кВт, що підсумується з нестачею енергії, переданою з шостого інтервалу, та дає нестачу в 133,5447 кВт, яка й передається холодним утилітам.

Наступним кроком побудуємо каскад позитивних теплових потоків. Для цього до гарячих утиліт додаємо найбільшу нестачу тепла 42,4488 кВт і знаходимо тепловий баланс для кожного температурного інтервалу таким же чином, як наведено вище. У результаті маємо каскад табличного алгоритму при цільових значеннях гарячих утиліт – рис. 2.

В результаті виконання розрахунку методом табличного алгоритму отримали, що $Q_{Hmin} = 42,4488$ кВт, а $Q_{Cmin} = 175,9935$ кВт. Наразі ми визначили температури пінча для гарячих $T_{Hпінч} = 98$ °С та холодних потоків $T_{Cпінч} = 94$ °С.

Наступний великий етап – побудова сіткової діаграми.

На звичайній технологічній схемі при проектуванні дуже важко провести поділ технологічної схеми ректифікації на підсистему, що перебуває вище пінча, і підсистему нижче пінча. Найбільше зручно це зробити, якщо представити технологічні потоки технологічної схеми ректифікації за допомогою сіткової діаграми, на якій показуються тільки операції теплопередачі.

Розділяємо технологічні потоки ректифікації на дві підсистеми, де вертикальні лінії показують локалізацію пінча. Ліворуч від вертикальних ліній перебуває підсистема потоків, що розташована вище пінча, праворуч – нижче пінча (рис. 3).

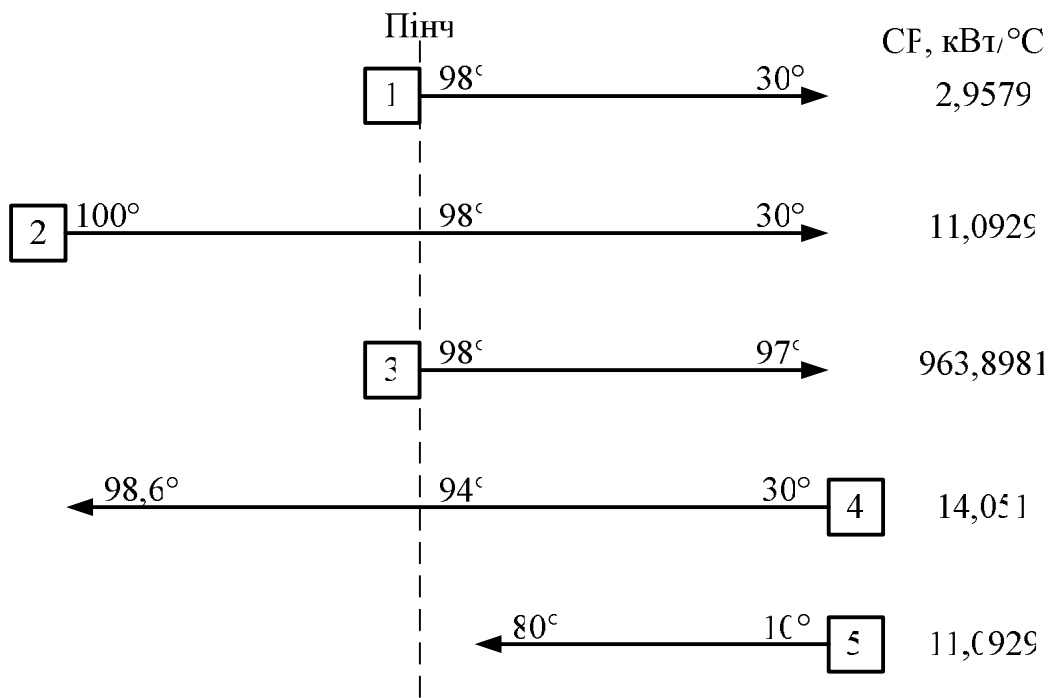


Рис. 3. Сіткова діаграма технологічної системи:
1–3 – гарячі потоки; 4–5 – холодні потоки

В області пінча діють найменші рушійні сили теплопередачі, тому це найбільш стиснута область для можливих розміщень рекуперативних теплообмінників. Дійсно, на всіх теплообмінних апаратах у районі пінча мінімальна різниця температур повинна строго дорівнювати $\Delta T_{\min} = 4^{\circ}\text{C}$. Починати проектування теплообмінної мережі необхідно в точці пінча, рухаючись від нього убік.

Розгляньмо підсистему, що знаходиться вище пінча, рис.3.

Для того, щоб вище пінча здійснити рекуперацію теплової енергії гарячих потоків холодними, необхідно, щоб кількість гарячих потоків була меншою або дорівнювала числу холодних потоків. Для нашої технологічної схеми ця умова виконується, бо кількість гарячих та холодних потоків однакова і дорівнює одиниці.

Виходячи з загальних умов, необхідно починати розміщення теплообмінних апаратів з гарячого потоку №2, що має максимальну потокову теплоємність $CP_2 = 11,0929 \text{ кВт/}^{\circ}\text{C}$. Знайти йому партнера для теплообміну серед холодних потоків неважко, але при цьому має виконуватися умова: $CP_H \leq CP_C$, де CP_C і CP_H – потокова теплоємність холодного та гарячого потоків, $\text{кВт/}^{\circ}\text{C}$.

Для гарячого потоку № 2 – це холодний потік № 4 з потоковою теплоємністю $CP_2 = 14,051 \text{ кВт/}^\circ\text{С}$.

Щоб скоротити кількість теплообмінних апаратів будемо використовувати принцип максимального навантаження кожного рекуперативного теплообміннику у тепловій мережі технологічної системи, що розглядається.

Для того, щоб максимізувати навантаження в теплообмінниках обчислимо зміну потокової ентальпії кожного потоку.

Зміна ентальпії гарячих потоків:

$$\Delta H_i = CP_i \cdot (T_{Ti} - T_{Si}),$$

де T_S – температура постачання, $^\circ\text{С}$;

T_T – цільова температура, $^\circ\text{С}$.

Зміна ентальпії гарячого потоку №2: $\Delta H_2 = 22,1858 \text{ кВт}$.

Для холодних потоків обчислюється так само: $\Delta H_4 = 64,6346 \text{ кВт}$.

Запишемо ці значення на потоковій діаграмі поруч із відповідними потоками. Максимізуємо теплове навантаження теплообмінного апарата, розміщеного на потоках № 2 і № 4. У цьому випадку мінімальна зміна ентальпії гарячого потоку дорівнює $\Delta H_2 = 22,1858 \text{ кВт}$, тому й теплове навантаження цього теплообмінного зв'язку буде таке ж. Відзначимо потік № 2.

Запишемо значення теплових навантажень під відповідним зображенням теплообмінного апарата на сітковій діаграмі рис 4.

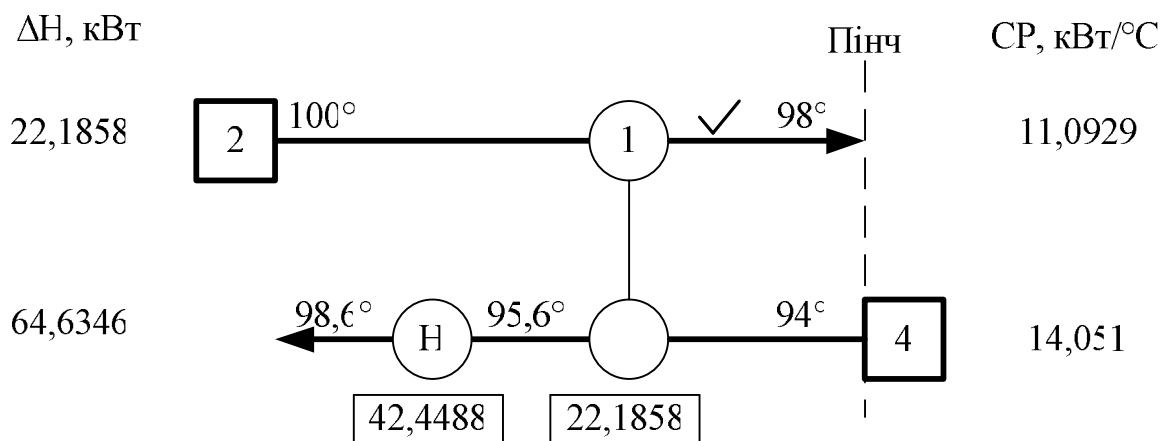


Рис. 4. Підсистема вище пінча:

1 – теплообмінник; 2 – гарячий потік; 4 – холодний потік; Н – нагрівач

Після розміщення на сітковій діаграмі цього теплообмінника в нас залишилося невдоволеним навантаження на холодному потоці № 4 потужністю, яка необхідна для нагрівання четвертого потоку після рекуперативного теплообмінника до його цільової температури, що дорівнює 98,6 °С.

Визначаємо цю потужність: $\Delta H = \Delta H_4 - \Delta H_2 = 42,4488$ кВт.

Вся теплота гарячого потоків під пінчем вже рекуперована завдяки холодному за допомогою розміщення теплообмінника. Тому, щоб довести потік № 4 до його цільової температури, нам необхідно використовувати гарячі утиліти, наприклад, нагрівати потік паром. Відзначаємо це на сітковій діаграмі.

Нам невідома температура холодного потоку на гарячому боці встановленого теплообмінника. Використовуючи рівняння балансу ентальпії, обчислюємо відсутню температуру.

Температура холодного теплоносія на вході в нагрівач з рівняння теплового балансу визначиться величиною:

$$T_{\text{вх.н.}} = T_{\text{Т}} - (\Delta H / CP_4) = 95,6 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Розгляньмо підсистему, що знаходиться нижче пінча.

Для того, щоб нижче пінча здійснити рекуперацію теплової енергії холодних потоків гарячими, необхідно, щоб кількість холодних потоків була меншою або дорівнювала числу гарячих потоків. Хоч для нашої схеми ця умова й виконується, задля більш ефективної рекуперації енергії із мінімальною кількістю втрат, розщепимо холодний потік № 5 на два паралельних потоки. Початкову потокову теплоємність п'ятого холодного потоку $CP_5 = 11,0929$ кВт/°С розділяємо (рис. 5) на дві неоднакові теплоємності $CP_{5.1} = 10,776$ кВт/°С та $CP_{5.2} = 0,3169$ кВт/°С.

Необхідно починати розміщення теплообмінників з холодного потоку № 4, що має максимальну потокову теплоємність $CP_4 = 14,051$ кВт/°С. Знайдемо йому партнера для теплообміну серед гарячих потоків, при цьому має виконуватися умова: $CP_{\text{Н}} \geq CP_{\text{С}}$.

Для холодного потоку № 4 – це гарячий потік № 3 з потоковою теплоємністю $CP_3 = 963,8981$ кВт/°С.

Таким же чином підбираємо партнера для інших холодних.

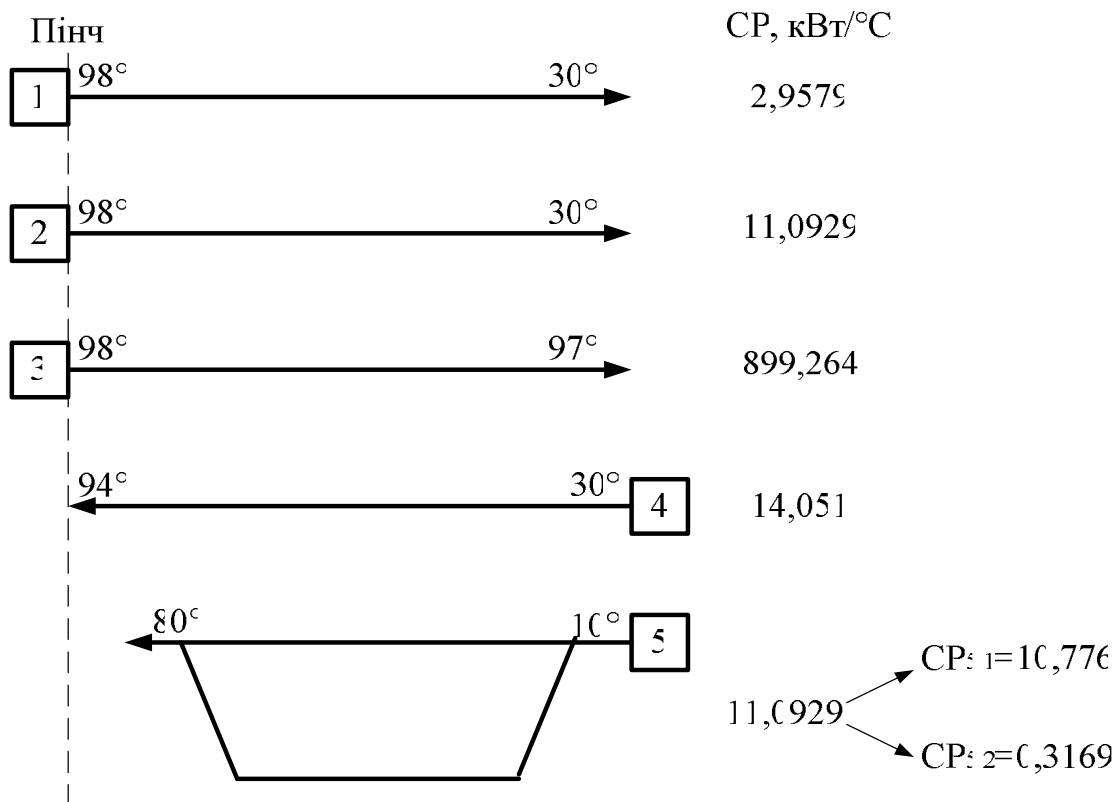


Рис. 5. Підсистема нижче пінча

Для максимізації навантаження в теплообмінниках обчислимо зміну потокової ентальпії кожного потоку у підсистемі нижче пінча (ці обчислення є типовими і аналогічні тим, що розглянуто у підсистемі вище пінча).

Для холодних потоків: $\Delta H_4 = 899,264$ кВт; $\Delta H_5 = 776,503$ кВт;
 $\Delta H_{5,1} = 754,32$ кВт; $\Delta H_{5,2} = 22,183$ кВт.

Для гарячих потоків: $\Delta H_1 = 201,1372$ кВт; $\Delta H_2 = 754,32$ кВт;
 $\Delta H_3 = 963,8981$ кВт.

Запишемо ці значення на потоковій діаграмі поруч із відповідними потоками. Максимізуємо теплове навантаження на усіх потоках:

на потоках № 3 і № 4: $\Delta H_4 = 899,264$ кВт;
на потоках № 2 і № 5.1: $\Delta H_{5,1} = 754,32$ кВт;
на потоках № 1 і № 5.2: $\Delta H_{5,2} = 22,183$ кВт.

Запишемо значення теплових навантажень під відповідним зображенням теплообмінного апарата на сітковій діаграмі.

Після розміщення на сітковій діаграмі цього теплообмінника в нас залишилося невдоволенням навантаження на гарячому потоці № 1 потуж-

ністю, яка необхідна для охолодження цього потоку, після четвертого рекуперативного теплообмінника до його цільової температури, що дорівнює 30 °С.

Визначаємо ці потужності: $\Delta H' = \Delta H_5 - \Delta H_1 = 178,9542$ кВт.

Для того, щоб привести потік № 1 до його цільової температури, необхідно використовувати холодні утиліти, наприклад, охолоджувати потік водою. Відзначаємо це на сітковій діаграмі, рис 6.

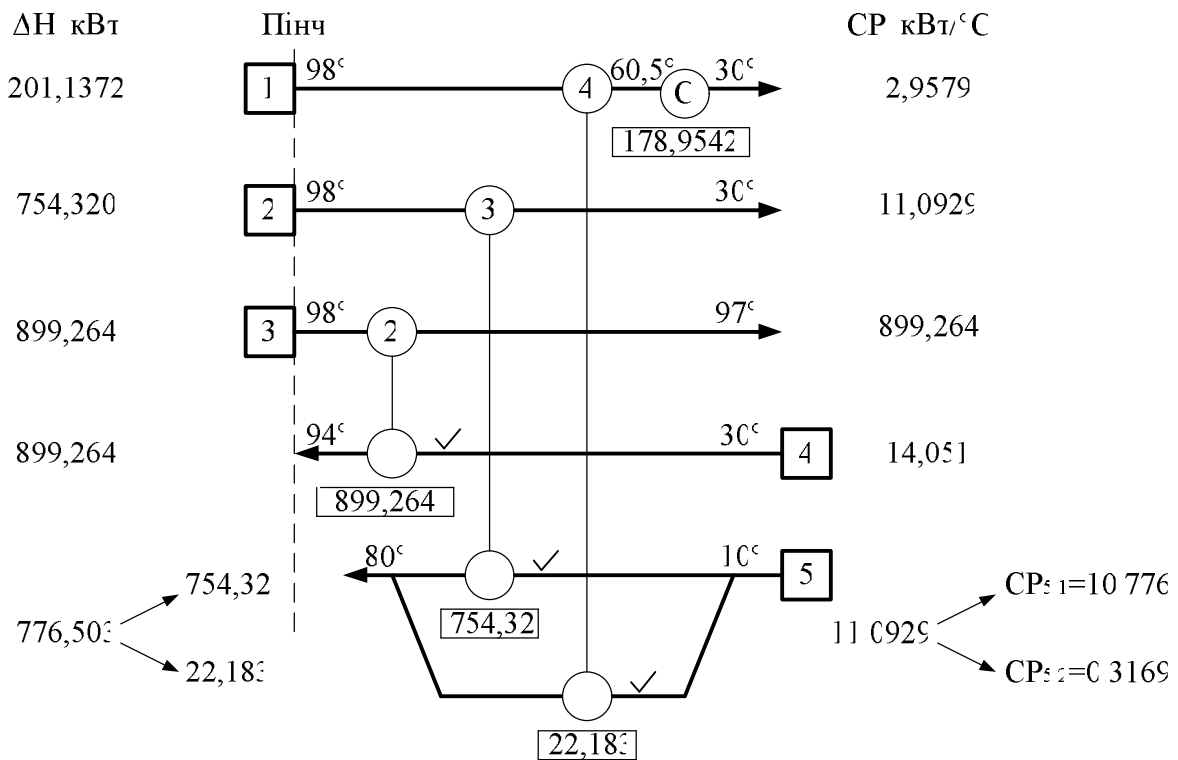


Рис. 6. Підсистема нижче пінча:
1–3 – гарячі потоки; 4–5 – холодні потоки; С– охолоджувач

Нам невідома температура гарячих потоків на холодному боці встановлених теплообмінників. Обчислюємо їх, використовуючи рівняння балансу ентальпії.

Температура гарячого теплоносія на вході в охолоджувач на потоці №1 з рівняння теплового балансу визначиться так:

$$T_{\text{вх.о.}} = T_T + (\Delta H' / CP_1) = 60,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким чином, спроектовано систему теплообмінників, в тому числі чотири рекуперативних, один нагрівач і два охолоджувача. Покажемо це на повній сітковій діаграмі, рис 7.

Ми закінчили проектування системи теплообміну вище пінча й нижче пінча. Результати порівняння витрат енергії утиліт до і після реконструкції наведені в табл. 4.

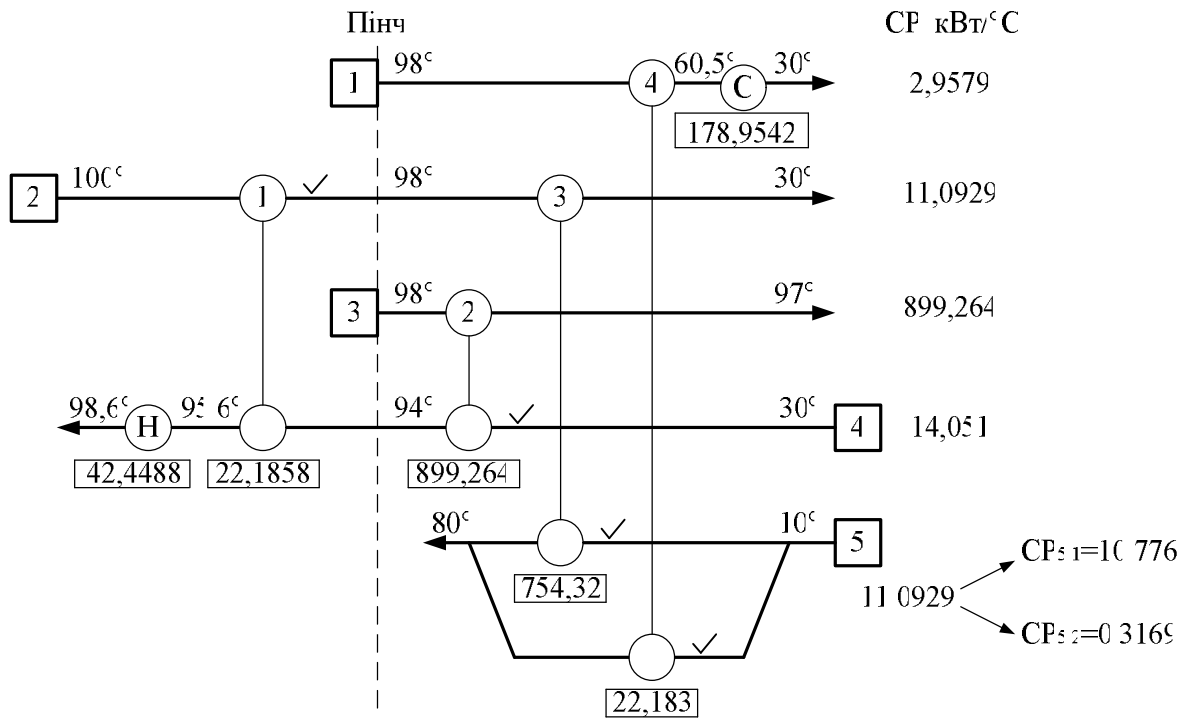


Рис. 7. Сіткова діаграма технологічних потоків:
1–3 – гарячі потоки; 4,5 – холодні потоки; 1–4 – теплообмінники;
Н – нагрівач; С – охолоджувач

Таблиця 4. Порівняння енергетичних характеристик існуючої та пропонуваної схем реконструкції теплообмінних мереж технологічної системи ректифікації

| Технологічна схема | Гарячі утиліти Q_{Hmin} , кВт | Холодні утиліти Q_{Cmin} , кВт |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| До реконструкції | 1876,904 | 1740,4014 |
| Після реконструкції | 42,4488 | 175,9935 |

Для заданого значення ΔT_{\min} методами пінч-проекування синтезовано проект схеми теплообмінної системи (сіткова діаграма). Створення рекуперативної системи установки за пропонованою схемою дозволить знизити потужність гарячих утиліт, що споживається процесом до 42,4488 кВт, а потужність холодних – до 175,9935 кВт.

Висновки. Розглянувши методологію застосування основних методів теплової пінч-інтеграції процесів, ми дійшли однозначного висновку щодо можливості коректного використання екстрагованих вихідних даних безвідносно до технологічної схеми, а знаючи задану лише мінімальну різницю температур. Це ще раз доводить наочність та ефективність методів немашинного розрахунку. Слід зазначити, що розглянуті методи є далеко не єдиними, але, безумовно, одними з найзручніших.

Список літератури: 1. *Смит Р.* Основы интеграции тепловых процессов / *Р. Смит, Й. Клеменш, Л.Л. Тобажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев* – Х.: НТУ «ХПИ», – 2000. – 458 с. 2. *Linnhoff, B.* Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks / *B.Linnhoff* – University of Leeds: PhD Thesis, – 1979. 3. *Капустенко П.А.* Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы / *П.А. Капустенко, А.К. Кузин, Е.Л. Макаровский, Л.Л. Тобажнянский, Л.М. Ульев, Е.Б. Черная* – Х.: ООО Издательский дом «Вокруг цвета». – 2004. – 312 с.

Надійшла до редакції 20.03.2014

УДК 608.2

Застосування методу табличного алгоритму «Каскад» та робота з сітковою діаграмою / Ульєв Л.М., Гарєв А.О, Миронов А.Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження в науковій роботі студентів. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 16 (1059). – С. 45 – 58.

Цели этой работы – сделать обзор методологии использования основных методов тепловой интеграции процессов («Каскад») и пинч-анализа (сеточная диаграмма), а также исследовать корректное использование экстрагированных исходных данных безотносительно технологической схемы, зная только минимальную разницу температур.

Ключевые слова: интеграция процессов, пинч-анализ, «Каскад», сеточная диаграмма.

The aim of this work is to do the review of methodologies of the using the main methods of heat integration of the processes ("Cascade") and pinch-analysis (grid diagram). Also correct using extracted datas irrespective technological scheme and knowing just minimum difference of the temperatures is researched.

Keywords: processes integration, pinch-analysis, "Cascade", grid diagram.