

Арсеньєва О.П.¹, д.техн.н., професор, Фрідлер Ф.³, доктор наук, професор,
Орош А.², аспірант, Капустенко П.О.¹, к.техн.н., професор

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ТА ВИТРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ Р-ГРАФІВ

¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна

²Кафедра інформатики та системних технологій, Університет Панонії, Веспрем,
Угорщина

³Інститут інженерії технологічних процесів та сталого розвитку,
Католицький Університет Петера Пазманя, Будапешт, Угорщина

Ключові слова: теплообмінний апарат, теплопередача, інтеграція тепла, теплообмінні мережі.

Вступ. Існуючі методи синтезу технологічних мереж в основному базуються на математичному моделюванні та супер-структурах. Для цього використовуються методи лінійного чи нелінійного програмування зі змішаним цілим числом, або комбінаторні підходи. Інтеграція тепла при синтезі технологічних процесів є надзвичайно складним завданням в інженерії технологічних систем і має велике значення для сталого функціонування промислових установок. Сучасні підходи включають пінч-технологію, моделювання, евристичне та частково-цілочислове програмування на основі супер-структури [1].

Синтез технологічної мережі повинен включати ефективну теплову інтеграцію системи теплопостачання, розподілу та використання енергії, включаючи всі інші існуючі джерела енергії та споживачі тепла. Така система може включати велику кількість потоків, які потребують нагрівання, і потоків, які мають теплову енергію, що можна використовувати по мірі їх охолодження. Ці потоки можуть обмінюватися тепловою енергією з використанням теплообмінного обладнання, які розглядаються як система пристроїв, що перетворюють теплову енергію гарячих потоків у теплову енергію холодних потоків, та їх сукупність представляє теплообмінну мережу підприємства. При одній і тій же системі потоків структура теплообмінної мережі і ділянки теплообміну, на яких використовуються окремі теплообмінники, можуть значною мірою змінюватися при різних значеннях таких параметрів, як теплові витрати, чисельність теплообмінників, площа передачі тепла та вартість апаратів.

Синтез теплової мережі підприємства являє собою проблему пошуку її структури, параметрів, та конструкції теплообмінних апаратів, які відповідають оптимуму певної цільової функції. Широко прийняті підходи до проектування теплових мереж підприємств – це математичне програмування, Пінч-аналіз та супер-структури.

Супер-структурний підхід при застосуванні до синтезу теплової мережі спирається на розробку звідної структури розглянутої мережі. Зазвичай супер-структура розробляється поетапно або блоками, кожен з яких являє собою групу з декількох послідовних інтервалів зміни ентальпії. У межах блоку кожен гарячий технологічний потік розбивається на ряд гілок, що відповідають кількості холодних потоків, представлених у блоці, і всі холодні потоки поділяються однаково. Після цього необхідно сумістити

кожну гарячу гілку з кожною холодною гілкою. Після розробки супер-структура піддається оптимізації. Набір рішень включає варіювання різних розділених гілок потоку і теплообмінників, теплових навантажень і розділених фракцій або швидкостей потоку розділених потоків. Цільова функція передбачає переважно загальну річну вартість мережі, хоча ця функція може бути доповнена певними додатковими умовами для подолання складних обмежень. Оскільки процедура оптимізації приймає структурні, а також процесні рішення щодо мережі, що проектується, вона є параметричною оптимізацією. Залежно від того, які припущення прийняті, може виникнути задача частково-цілочислового лінійного або нелінійного програмування. Лінійні задачі зазвичай отримують, передбачаючи ізотермічне змішування розщеплених гілок, а потім за допомогою кускової лінеаризації функцій капітальних витрат теплообмінника. При підході до надбудови можна включити й інші варіанти теплообміну – наприклад, прямі теплообмінні установки (тобто змішування) та різні типи теплообмінників (наприклад, двотрубний, пластинчастий, пластинчасто-реберний, кожухотрубний та інші).

Методологія супер-структур має декілька переваг при синтезі теплових мереж. Серед них: здатність одночасно оцінювати велику кількість структурних та експлуатаційних альтернатив; можливість автоматизації (у значній мірі) процедури синтезу; і здатність ефективно вирішувати багато додаткових питань, таких як вибір різних типів теплообмінників та залучення додаткових обмежень.

Концепція Р-графів, або процес-графів, є одним з ефективних інструментів інтеграції синтезу технологічних та теплових мереж [2]. Він застосовується для синтезу мереж, що пов'язані між собою, і здатний генерувати тільки n найкращих або всі технологічні мережі на додаток до оптимальної. Інтеграція проектування теплових мереж підприємства з Р-графами є багатообіцяючою, а можливість вибору вдосконаленого обладнання для передачі тепла розширить його застосування, забезпечивши сучасні рішення для промисловості.

Концепція Р-графів. Р-графи – це комбінаторний інструмент для синтезу технологічних мереж, який представляє супер-структуру за допомогою двостороннього графіка матеріалів та операційних підрозділів. Підхід базується на фундаментальних комбінаторних властивостях можливих технологічних структур. Ці властивості є загальними і не залежать від типів математичних моделей операційних блоків, отже, структура також є загальною.

Проблема синтезу мереж технологічних процесів у представленні Р-графів задається наборами операційних блоків з їх математичними моделями, сировиною (або утилітами) з їхніми одиничними цінами та продуктами з необхідними обсягами виробництва. Цільова функція також задається як функція параметрів операційних блоків і матеріалів (або утиліт) процесу. Комбінаторні властивості мережі операційних підрозділів процесу зібрані та формально описані як сукупність комбінаторних доцільних структур, сформульованих у п'яти аксіомах [3]. Пошук оптимальної мережі на Р-графі може бути зведений до безлічі комбінаторних доцільних мереж без ризику втрати оптимальності, забезпечуючи велике прискорення в пошуку оптимального процесу.

Допустимо, що M – заданий непустий набір об'єктів, заданий як різновиді матеріалів або матеріали, які трансформуються в процесі виробництва. Трансформація між двома підмножинами з набору M протікає у функціональній одиниці (operating unit – O), як продемонстровано на рис. 1, де коло відображає матеріал, а горизонтальна полоса – функціональну одиницю процесу. Цю функціональну одиницю необхідно сполучити з іншими функціональними одиницями за допомогою цих двох множин (матері-

алів та функціональних одиниць). Р-граф (M, O) містить взаємозв'язки між функціональними одиницями множини O (рис. 2).

Для пошуку оптимального рівня інтеграції тепла застосовується алгоритм гілок та меж, описаний в [4].

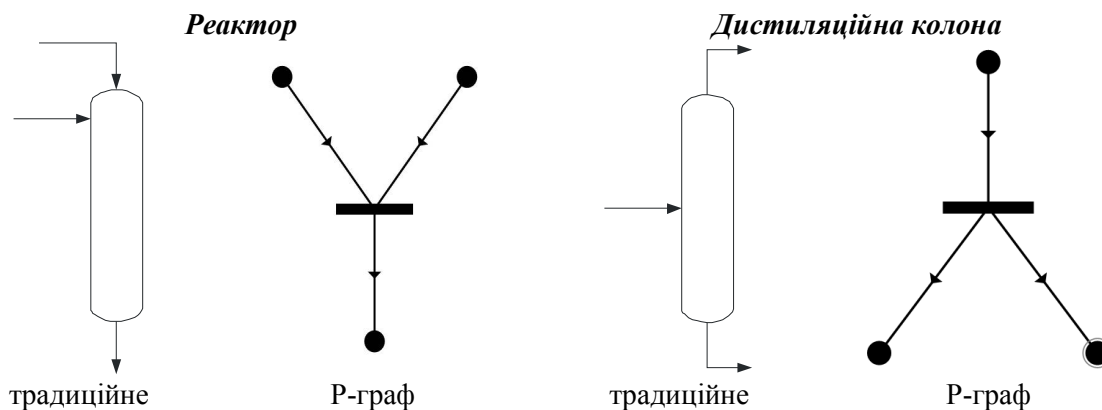


Рисунок 1 – Традиційне та Р-граф зображення реактору та дистиляційної колони

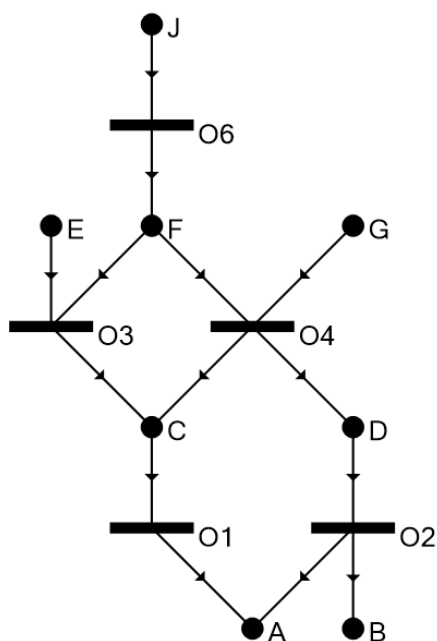


Рисунок 2 – Р-граф зображення мережі функціональних одиниць

У роботі [4] зазначено, що комбінаторний характер синтезу технологічної мережі на основі Р-графа може бути зручно поєднаний із методом інтеграції теплової мережі на основі композицій температурних інтервалів. Одночасне рішення синтезу технологічної та теплової мереж, засноване на алгоритмах Р-графів для технологічної мережі та специфічному алгоритмі інтеграції теплової мережі, виявилось корисним. Однак, оскільки в [4] інвестиційна вартість теплообмінника вважалася пропорційною площі теплообміну, вартість витрат не обов'язково була реалістичною. У роботі [5] розглянутий цей підхід було удосконалено наступним чином: функція витрат теплообмінника була узагальнена до лінійної або нелінійної функції з фіксованими параметрами, крім

того, проблема інтеграції теплообмінної мережі була однорідно вбудована в проблему синтезу технологічної мережі, що призводить до уніфікованої методики створення оптимального рішення одночасно розглянутих задач синтезу технологічної та теплової мереж. Але в обох роботах розглядаються тільки кожухотрубні теплообмінні апарати. Спроба розширити даний підхід та ввести розрахунок вартості пластинчастого теплообмінного обладнання, що може суттєво скоротити затрати на теплову мережу, розглядається в даній роботі.

Ілюстрація підходу для інтегрованого рішення синтезу технологічної та теплової мереж. Для ілюстрації підходу була розглянута технологічна мережа, супер-структура якої представлена на рис. 3(а). Літерою *H* позначені теплообмінні апарати для нагрівання матеріального потоку, літерою *C* – для охолодження. На рис. 3(б) показана максимальна структура даної технологічної мережі у вигляді Р-графа. Вузли O1, O2 та O3 на рис. 3(б) являють собою функціональні одиниці, тоді як вузли C1, H1 та H2 – теплообмінні вузли для охолодження та нагрівання. В таблицях 1 і 2 включені дані температур і теплоємності для кожного з теплообмінників для нагрівання та охолодження, а також параметри утилітних потоків. Необхідна кількість продукту, розглянутого в прикладі становить 50000 т/рік.

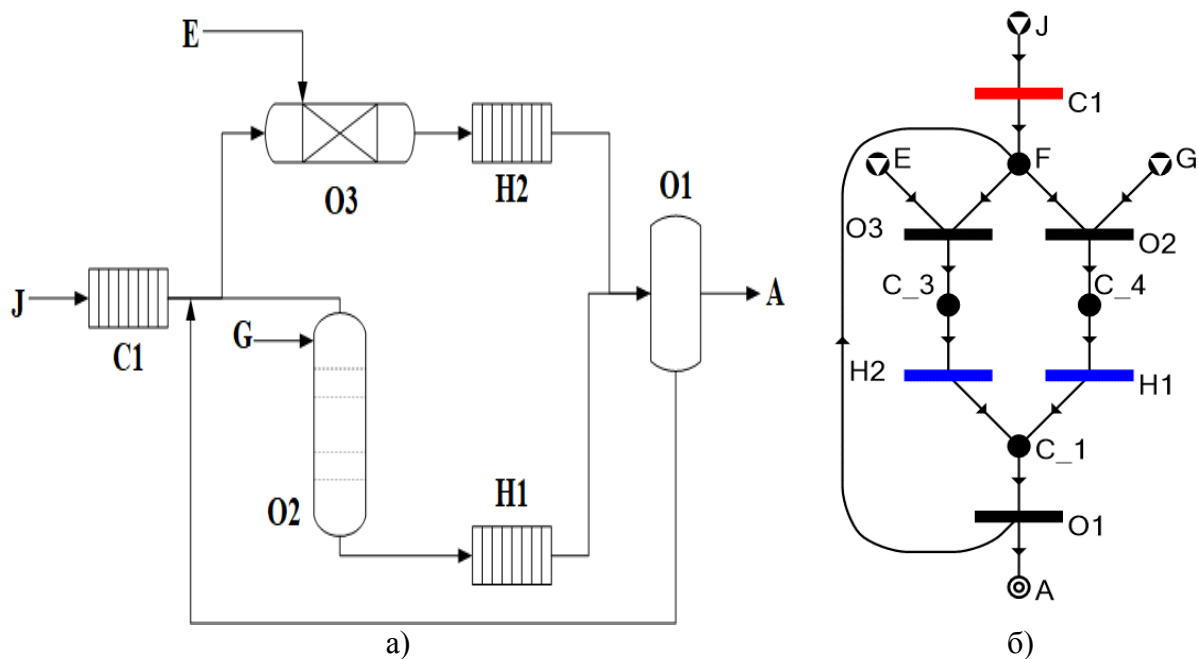


Рисунок 3 – Приклад для ілюстрації підходу: (а) супер-структура технологічної мережі; (б) максимальна структура у вигляді Р-графа

Таблиця 1 – Параметри для нагрівання та охолодження матеріальних потоків

Теплообмінник	T_{in} , К	T_{out} , К	C_p , кДж/(кг·К)
C1	298	353	4.15
H1	373	308	2.37
H2	363	308	2.37

Таблиця 2 – Параметри утилітних потоків

Вид потоку	T_{in} , К	T_{out} , К	Вартість, USD/ГДж
Гарячий	373	373	4.15
Холодний	393	308	2.37

По-перше, гарячі та холодні матеріальні потоки розбиваються на під-потоки на основі початкових та кінцевих температур інших потоків, як це описано у [4]. Потім генеруються композитні потоки з подальшим розширенням максимальної структури з усіма можливими теплообмінниками, включаючи потенційні інтеграції тепла, та отримують розвинену схему, представлену на рис. 4. Максимальна структура з цими теплообмінниками називається інтегрованою максимальною структурою. Оскільки матеріальний потік може мати різні температури через реалізацію процесу, відповідні потоки повинні бути відповідно представлені різними вузлами інтегрованої максимальної структури (наприклад, Н1_363 та Н1_373). Наприклад, теплообмінник HE2 знижує температуру потоку Н1 з 373 К до 363 К, збільшуючи температуру потоку С1 від 298 К до 353 К. Відповідні потоки позначаються Н1_373, Н1_363, С1_298 та С1_353 відповідно.

Вибір оптимальної структури з використанням пластинчастих теплообмінних апаратів. Пластинчасті теплообмінні апарати (ПТА) належать до теплообмінників з посиленою теплопередачею [6]. Для вибору їх оптимальної конструкції, які будуть відповідати заданим технологічним умовам, необхідно визначити оптимальні геометричні параметри пластин теплопередачі, які утворюють канали для руху теплоносіїв в теплообміннику. ПТА різної конструкції (розбірні, паяні, зварені) – один з найефективніших типів компактних теплообмінників, що застосовуються в промисловості. Вони вже довели свою ефективність та надійність у різних промислових сферах застосування. Принципи проектування та експлуатації ПТА добре описані в літературі, наприклад [7], [8].

Для визначення теплопередачі та гідравлічних характеристик ПТА в залежності від геометричних параметрів пластин та їх гофрування, існують узагальнені кореляції [9]. Вони дозволяють детально проектувати ПТА та обчислювати оптимальні геометричні параметри пластин та конфігурацію апарату для заданих умов процесу. Включення такої моделі в програмне забезпечення для проектування теплообмінних мереж дає можливість отримати оптимальну топологію мережі з мінімальною поверхнею теплообміну. При визначенні оптимальної довжини та швидкості теплообмінника для повного використання допустимого перепаду тиску, був застосований підхід, описаний у роботі [10]. Це дозволило створити математичну модель ПТА для визначення оптимальних апаратів в структурі Р-графів. Створене програмне забезпечення може бути включено до загального програмного пакету дизайну технологічних мереж на основі Р-графів. Для розробки програмного модуля використаний принцип оптимізації самої пластини та геометричних параметрів гофри для найбільш поширених типів гофрування. У створеному програмному забезпеченні проблема пошуку найкращої геометрії пластин для заданих технологічних умов, визначена на етапі пошуку комбінаторних можливих позицій та різноманітних навантажень для всіх теплообмінників, вирішується шляхом пошуку оптимального значення для безперервної нелінійної цільової функції в просторі дискретно-постійних змінних. На основі розробленої моделі ПТА та створеного програмного забезпечення розробляється алгоритм оптимізації. Цільовою функцією є мінімальна поверхня теплопередачі, яка буде відповідати мінімальній вар-

тості теплообмінника при оцінці блоку в інтегрованій супер-структурі Р-графу (рис. 4). Інтервал між пластинами, довжина пластини, кут нахилу гофри до вертикальної осі пластини та співвідношення висоти гофри та шагу є оптимізованими змінними. Отримане оптимальне рішення можна розглядати як цільове значення теплообмінної поверхні ПТА, коли геометричні параметри пластини та її гофрування суворо відповідають розрахунковим оптимальним значенням.

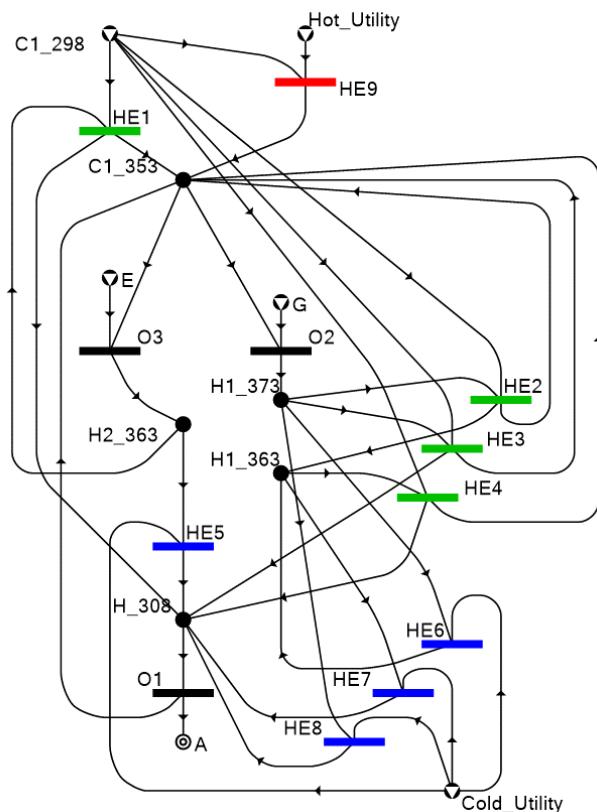


Рисунок 4 – Інтегрована максимальна структура, з відображенням усіх можливих теплообмінних апаратів

Для отримання ціни теплообмінного апарату необхідно визначити залежність від площі поверхні теплопередачі. Дані літератури щодо вартості компактних теплообмінників досить обмежені, особливо коли ці дані необхідні для проведення декількох розрахунків у процесі проектування теплообмінних мереж. У роботі [11] представлено рівняння для визначення встановленої вартості ПТА з пластинами з нержавіючої сталі та каркасом із вуглецевої сталі як функція еквівалентної площі теплопередачі F_e :

$$IC_{PHE} = 1950 \cdot F_e^{0.78} . \tag{1}$$

В роботі [12] надано рівняння для розрахунку вартості розбірного ПТА з пластинами з нержавіючої сталі для діапазону площі поверхні теплопередачі від 50 до 9000 футів² (або $4,65 \text{ m}^2 < F < 836 \text{ m}^2$):

$$C_{PHE} = 231 \cdot F^{0.639} . \tag{2}$$

Ціни на ПТА інших типів, крім розбірних, слід оцінювати за значно різними співвідношеннями. Впровадження паяних ПТА дозволило значно знизити ціни на діапазон поверхонь теплообміну до 80 m^2 , для яких виробляється паяний ПТА. Ці теплообмінники виготовляються методом пайки в стандартизованих розмірах з кроком площі поверхні теплообміну приблизно від 8 до 10 пластин для одного розміру пластини. У роботі [5] зазначено два рівняння для різних діапазонів площі поверхні теплопередачі (площі поверхні приблизно оцінюються відповідно до розміру, конструкції та кількості плит).

Для діапазону площ поверхні $0,13 \text{ m}^2 < F < 5.8 \text{ m}^2$ ціна в Євро визначається:

$$C_{BPHE} = 540 \cdot F^{0.8} . \quad (3)$$

Для пластин більшого розміра, тобто $2 \text{ m}^2 < F < 86 \text{ m}^2$:

$$C_{BPHE} = 805 \cdot F^{0.74} . \quad (4)$$

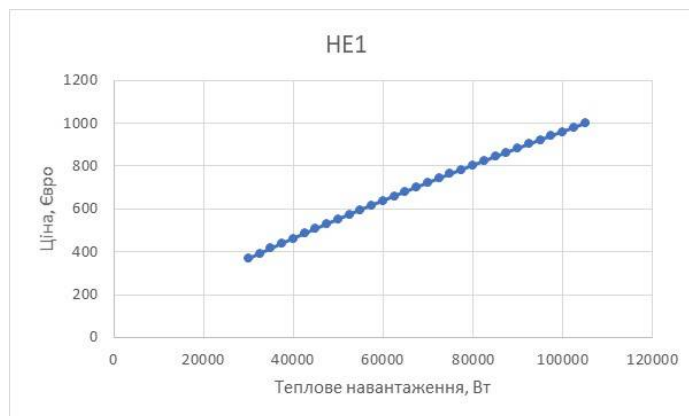
Оцінка параметрів конструкції та її собівартості для розбірних та паяних ПТА залежно від площі теплопередачі згідно рівнянь (2–4) реалізована у розробленому програмному забезпеченні.

Параметри усіх можливих теплообмінних апаратів, представлених у інтегрованій супер-структурі Р-графу (рис. 4), для яких проводилось визначення вартості, представлені у таблиці 3.

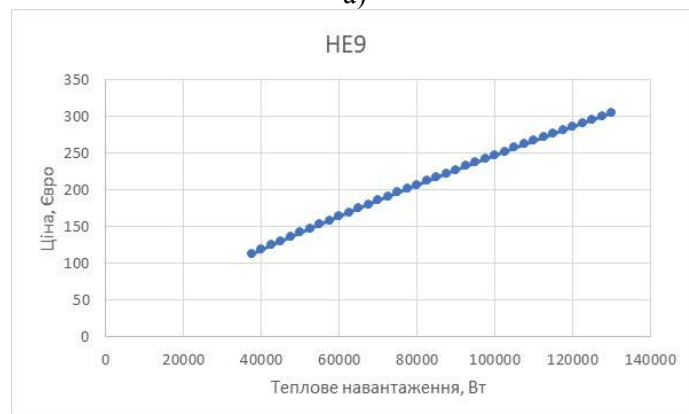
Використовуючи розроблене програмне забезпечення, була проведена оцінка різноманітних конструкцій ПТА з мінімальною площею теплопередачі для кожної позиції та визначена вартість кожного обраного апарату. Результати розрахунків для HE1 та HE9 представлені на рис. 5(а) та 5(б) відповідно. Як можна побачити на малюнку, динаміка зміни вартості зі зміною теплового навантаження має лінійну залежність. Цей факт дає можливість отримати оптимальні супер-структури з застосуванням ПТА у концепції Р-графів.

Таблиця 3 – Параметри теплообмінних апаратів інтегрованої супер-структури

№	Температура гарячого теплоносія (1)		Температура холодного теплоносія (2)		Границі зміни теплового навантаження	
	T_{lin} , К	T_{lout} , К	T_{2in} , К	T_{2out} , К	Q_{min} , kW	Q_{max} , kW
HE1	363	308	298	353	30	105
HE2	373	363	298	353	35	60
HE3	373	308	298	353	330	370
HE4	363	308	298	353	260	320
HE5	363	308	293	308	250	320
HE6	373	363	293	308	35	60
HE7	373	308	293	308	200	320
HE8	363	308	293	308	240	370
HE9	373	373	298	353	20	130



а)



б)

Рисунок 5 – Вартість оптимальних ПТА для різних теплових навантажень: (а) HE1; (б) HE9

Висновки. У статті представлено підхід до вибору оптимальної конструкції розбірних та паяних пластинчастих теплообмінників для теплообмінної мережі з інтеграцією в концепцію Р-графів. Розроблене програмне забезпечення дозволяє встановити оптимальну конструкцію теплообмінників для рідини-рідини. Отримані результати показали лінійну залежність ціни від теплового навантаження для ПТА. Це дозволить ввести теплообмінні апарати пластинчастого типу при побудові інтегрованих суперструктур для Р-графів та визначити оптимальну структуру теплової мережі із застосуванням ПТА при синтезі технологічних мереж підприємств.

Література

1. Smith R., Jobson M., Chen L. Recent development in the retrofit of heat exchanger networks // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – Т. 30, № 16. – P. 2281–2289.
2. Friedler F., Aviso K. B., Bertok B., Foo D. C. Y., Tan R. R. Prospects and challenges for chemical process synthesis with P-graph // *Current Opinion in Chemical Engineering*. – 2019. – Т. 26. – P. 58–64.
3. Friedler F., Tarján K., Huang Y.W., Fan L.T. Graph-theoretic approach to process synthesis: axioms and theorems // *Chemical Engineering Science*. – 1992. – Т. 47, № 8. – P. 1973–1988.
4. Nagy A. B., Adonyi R., Halasz L., Friedler F., Fan L. T. Integrated synthesis of process and heat exchanger networks: algorithmic approach // *Applied Thermal Engineering*. – 2001. – Т. 21, № 13. – P. 1407–1427.

5. Orosz A., Pimentel J., Friedler F. Simultaneous Synthesis of Processes with its Heat Exchanger Networks: P-graph Approach // Chemical Engineering Transactions. –2019. – Т. 76. – P. 1219–1224.
6. Wang Y., Pan M., Bulatov I., Smith R., Kim J.-K. Application of intensified heat transfer for the retrofit of heat exchanger network // Applied Energy. – 2012. – Т. 89, № 1. – P. 45–59.
7. PHEs. Design, Applications and Performance. / Wang L., Sunden B., Manglik R. M. – Southampton, UK: WIT Press, 2007.
8. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. / Klemes J. J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L.: CRC Press, 2015. – 354 p.
9. Arsenyeva O. P., Tovazhnyansky L. L., Kapustenko P. O., Demirskiy O. V. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2012. – Т. 46, № 6. – P. 634–641.
10. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., Khavin G. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions // Energy. – 2013. – Т. 57. – P. 201–207.
11. Hall S.G., Ahmad S., Smith R. Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings and exchanger types // Computers & chemical engineering. – 1990. – Т. 14, № 3. – P. 319–335.
12. Vatauvuk W. M. A potpourri of equipment prices-Part 1 // Chemical Engineering. – 1995. – Т. 102, № 8. – P. 68.

УДК 66.045.01

Арсеньєва О.П., Фрідлер Ф., Орош А., Капустенко П.О.

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ТА ВИТРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ Р-ГРАФІВ

Збільшення рекуперації тепла в промисловості та побуті є ключовим моментом зменшення споживання енергії. Це значною мірою може бути досягнуто за рахунок підвищення ефективності як технологічних установок, так і промислового обладнання. Оптимальне визначення структури мережі з технологічним обладнанням - це завдання синтезу технологічної мережі, що включає інтеграцію конструкції процесу з оптимальною інтеграцією тепла. Оскільки вибір технологічної мережі під час синтезу має великий вплив на вартість, надійність та рівень інтеграції тепла, ці три елементи повинні враховуватися одночасно при синтезі технологічних процесів, впроваджуючи більш ефективні системи передачі тепла з покращеною конструкцією. Для його досягнення вкрай необхідний загальний підхід та інструмент моделювання, який одночасно охоплює витрати, надійність та рівень цілей інтеграції тепла для оптимального проектування технологічної мережі. У даній роботі розглядається оптимальний вибір теплообмінного обладнання пластинчастого типу для синтезу теплообмінної мережі підприємства з застосуванням теорії Р-графів.

Ключові слова: теплообмінний апарат, теплопередача, інтеграція тепла, теплообмінні мережі.

УДК 66.045.01

Арсеньева О.П., Фридлер Ф., Орош А., Капустенко П.А.

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ И РАСХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ Р-ГРАФОВ

Увеличение рекуперации тепла в промышленности и быту является ключевым моментом уменьшения потребления энергии. Это в значительной степени может быть достигнуто за счет повышения эффективности как технологических установок, так и промышленного оборудования. Оптимальное определение структуры технологической сети представляет собой задачу совместной интеграции промышленного оборудования с оптимальной интеграцией тепла. Поскольку выбор технологической сети во время синтеза имеет большое влияние на стоимость, надежность и уровень интеграции тепла, эти три элемента должны учитываться одновременно при синтезе технологических процессов, внедряя более эффективные системы передачи тепла с улучшенной конструкцией. Для его достижения крайне необходим общий подход и инструмент моделирования, который одновременно охватывает расходы, надежность и интеграцию тепла для оптимального проектирования технологической сети. В данной работе рассматривается оптимальный выбор теплообменного оборудования пластинчатого типа для синтеза технологической сети предприятия с применением теории Р-графов.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплопередача, интеграция тепла, тепловые сети.

Arsenyeva O., Friedler F., Orosz Á., Kapustenko P.

PROCESS NETWORK SYNTHESIS FOR ENERGY AND COST MINIMIZATION USING THE P-GRAPH APPROACH

Increasing heat recovery in industry and household is the key point for reduced energy consumption. It can largely be achieved by improved efficiency of both process plants and equipment units. The optimal determination of the network structure with the processing equipment is the task of process network synthesis, which includes the integration of the process design with optimal heat integration. Since the selection of a process network during synthesis has major influence on the cost, the reliability, and the level of heat integration, these three items must be considered simultaneously in process synthesis, implementing more efficient heat transfer systems with enhanced design. To achieve it, a general approach and modeling tool that simultaneously covers the cost, reliability, and level of heat integration targets is highly demanded for optimal process network design. The present paper discusses the optimal selection of heat exchange equipment of plate type for process network synthesis using P-graph approach.

Keywords: plate heat exchanger, heat transfer, heat integration, heat exchanger networks.