

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ  
ІНСТИТУТ”

Болдирев Станіслав Олександрович

УДК 66.045.1

Теоретичні та експериментальні дослідження  
ефективних систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2007 р.

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій процесів та апаратів Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Міністерства освіти і науки України.

**НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:** доктор технічних наук, професор

**Товажнянський Леонід Леонідович,**

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, МОН України, ректор.

**ОФЦІЙНІ ОПОНЕНТИ**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Фрумін Віталій Мусійович,**

Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії, Міністерства промислової політики України (м. Харків), зав. лабораторії тепломасообмінної апаратури.

кандидат технічних наук

**Суліма Анатолій Миколайович,**

ВАТ "Український науково-дослідний та конструкторський інститут хімічного машинобудування", Міністерство промислової політики України (м. Харків), заступник директора з науково-дослідної та конструкторської роботи.

Захист відбудеться “ 25 ” квітня 2008 р. о 10 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.05 Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул.. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у центральній науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розіслано “      ” березня 2008 р

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Тимченко В.К.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Промислові підприємства України, які використовують хіміко-технологічний спосіб переробки сировини споживають набагато більше теплової енергії ніж закордонні аналоги. Це є наслідком того, що системи теплообмінних апаратів цих підприємств проектувалися під час досить низьких цін на енергоносії і не приділялося значної уваги рекуперації теплової енергії та розробці ефективних систем теплообміну. Тому зараз, після значного підвищення цін на енергоносії ці підприємства працюють не в оптимальному режимі.

Вищенаведене визначило актуальність напрямку досліджень, сутність яких полягає в теоретичних та експериментальних дослідженнях систем рекуперативного теплообміну у хіміко-технологічних процесах шляхом побудови складових кривих та використанню вискоефективного теплообмінного обладнання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій, процесів та апаратів НТУ "ХП" у рамках держбюджетної теми МОН України: "Розвиток теорії синтезу інтегрованих теплоенергетичних процесів підприємств промислових регіонів України для суттєвого зменшення енергоспоживання" (ДР № 0106U001497, 2006-2008), де здобувач був виконавцем окремих розділів та міжнародного науково-дослідного проекту SYNERGY No. 4.1041, заснованого Європейською Комісією в галузі освіти та культури.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в аналізі та визначенні недоліків системи рекуперативного теплообміну та її удосконаленні.

У зв'язку з цим поставлені задачі:

- розробити математичну модель системи рекуперативного теплообміну хіміко-технологічної системи;
- експериментально дослідити хіміко-технологічну систему, параметри технологічних потоків, споживання зовнішніх енергоносіїв та вивчити режим роботи теплообмінних апаратів;
- визначити структуру системи рекуперативного теплообміну та ідентифікувати теплообмінні апарати, що працюють неефективно;
- визначити цільові значення зовнішніх енергоносіїв,  $\Delta T_{\min}$  та структуру ефективної системи теплообмінних апаратів;
- удосконалити методику розрахунків пластинчастих теплообмінних апаратів.

**Об'єкт дослідження** – система теплообмінних апаратів хіміко-технологічного процесу.

**Предмет дослідження** – мінімальний температурний напір на теплообмінному обладнанні, структура теплообмінної системи.

**Методи дослідження** – в роботі використані основні принципи інтеграції теплових процесів та методики пінч-аналізу. Для побудови складових кривих технологічних потоків була розроблена

вдосконалена методика, яка дозволяє аналізувати потоки з фазовими змінами. Для визначення споживання зовнішніх енергоносіїв в хіміко-технологічних процесах і розмір енергії рекуперації використовувався метод пінч-аналізу. Визначення величини  $\Delta T_{\min}$  при реконструкції теплообмінної системи використовувалися вартісні залежності зведених витрат. Для створення проекту реконструкції теплообмінної системи використовувався метод сіткових діаграм. Структура зовнішніх енергоносіїв оцінювалася за допомогою великих складових кривих. Для розрахунків теплообмінного обладнання використовувалася одномірна теорія руху та конденсації пари в пластинчастих конденсаторах.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше була досліджена система теплообмінних апаратів підприємств хіміко-технологічного сектору за допомогою методів інтеграції процесів. Визначено споживання зовнішніх енергоносіїв та розмір енергії рекуперації;
- вперше визначені цільові значення зовнішніх енергоносіїв та оптимальне значення  $\Delta T_{\min}$  для системи теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. Розроблено проект реконструкції ефективних систем теплообмінних апаратів для визначеного  $\Delta T_{\min}$ ;
- удосконалена методика побудови складових кривих технологічних потоків та великої складової кривої, яка дозволяє аналізувати потоки з фазовими змінами;
- експериментально досліджено системи теплообмінних апаратів на прикладі переробки кам'яновугільної смоли та виробництва цукру.

**Практична цінність роботи.** Розроблено проекти реконструкції систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. Визначені цільові значення споживання теплової енергії для розроблених систем теплообміну при заданій величині  $\Delta T_{\min}$ . Удосконалено методику розрахунку пластинчастих теплообмінників, яка може ефективно використовуватися на стадії проектування обладнання.

Розроблено пакет прикладних програм на ЕОМ для побудови складових кривих технологічних потоків, великих складових кривих, визначення оптимального  $\Delta T_{\min}$  системи теплообміну і визначення економічних показників при реконструкції систем теплообміну підприємств хіміко-технологічного комплексу. Розроблене програмне забезпечення адаптовано для учбового процесу та наукових досліджень на кафедрі інтегрованих технологій процесів та апаратів НТУ "ХП". Розраховано та впроваджено ефективне сучасне теплообмінне обладнання для розробленої системи теплообміну на підприємстві цукровий завод АО "КАНТ", (м. Тараз, Казахстан).

**Особливий внесок здобувача.** Всі основні положення, які винесені на захист, одержані здобувачем самостійно. Серед них: виконання експериментальної частини роботи, створення математичною моделі, інтерпретація одержаних результатів та формулювання основних висновків дисер-

тації. Постановка мети і задач досліджень і аналіз отриманих даних виконано разом з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи були представлені на I, II, III, IV та VII Міжнародних науково-практичних конференціях "Інтегровані технології та енергозбереження" - ІТЕ (м. Алушта, 2001 р, 2002 р, 2003 р, 2004 р, 2007 р.), XV, XVI, XVII Міжнародних конгресах по хімічній технології - CHISA (м. Прага, 2002 р, 2004 р, 2006 р.), X Міжнародній науково-практичній конференції "Наука техніка, освіта, навколишнє середовище" (м. Харків, 2002 р.), IV Всеукраїнській науково-методичній конференції з міжнародною участю "Екологія, інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій" (м. Дніпродзержинськ, 2002 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "Логістика і економіка ресурсозбереження та енергозбереження в промисловості" ЛЕРЕП-2002 (м. Москва, 2002 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 7 статтях, з яких 6 – у фахових виданнях ВАК України.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 157 сторінок, з них 33 ілюстрації по тексту, 9 ілюстрація на 9 сторінці; 10 таблиць по тексту; 4 додатків на 18 сторінках; 159 найменування використаних літературних джерел на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну значимість роботи.

**У першому розділі** "Огляд літератури і вибір напрямків досліджень" наведено аналітичний огляд науково-технічної інформації закордонних та вітчизняних авторів з методів аналізу систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. Розглянуті основні вимоги, щодо яких повинні дотримуватись проектувальники при розробці виробництв з мінімальним споживанням енергії.

Описано виникнення методів інтеграції процесів та розглянуто перший досвід їх використання, розвиток цих методів і розширення галузі їх застосування. Наведена порівняльна характеристика методів інтеграції процесів з іншими методами аналізу та систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. При цьому доведено, що застосування методів інтеграції при реконструкції хіміко-технологічних систем складає майже 20-30% економії разом з економією капітальних витрат. Наведена оцінка ефекту енергозберігаючого потенціалу українських коксохімічних та цукрових заводів при реконструкції їх за допомогою методів теплової інтеграції процесів.

На засадах аналізу наведених літературних даних були визначені основні напрямки досліджень.

У другому розділі "Методики досліджень та характеристика об'єктів досліджень" наведено загальний план щодо збору даних, визначенню енергетичних цілей та необхідних значень  $\Delta T_{min}$  на теплообмінному обладнанні в системі рекуперації теплової енергії. Приведені методики аналізу теплообмінної системи промислових підприємств, а також методи розрахунку високоефективного теплообмінного обладнання для реалізації проектів реконструкції теплообмінних систем промислових підприємств.

Збір технологічних даних, необхідних для аналізу енергоспоживання хіміко-технологічної системи проводився за оригінальною методикою. Ця методика також описана в другому розділі дисертації.

Для побудови складових кривих технологічних потоків за основу була використана методика, що описана раніше. Але застосування цієї методики в початковому вигляді виявилось неможливим, оскільки вона не враховувала наявність потоків з фазовими переходами в системі потоків, що аналізуються. Майже всі технологічні процеси в хімічній, нафтохімічній, харчовій та інших галузях промисловості мають у своєму складі потоки з фазовими змінами, тому необхідно було розробити удосконалену методику побудови складових кривих. Ця методика була розроблена та використана в даній роботі. В її основі лежить визначення функціональних залежностей для точок залому складових кривих технологічних потоків.

Рис. 1. Побудова складових кривих для заданого  $\Delta T_{min}$ . 1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива; QR – максимальна теплота рекуперації;  $Q_H$  – потужність гарячих зовнішніх енергоносіїв;  $Q_C$  – потужність холодних зовнішніх енергоносіїв.

За допомогою складових кривих технологічних потоків визначалося споживання гарячих та холодних теплоносіїв (утиліт) для заданого  $\Delta T_{min}$  між потоками в теплообмінному обладнанні, цільового значення площі поверхні теплообміну та точки пінча.

Розрахунок кількості теплообмінних апаратів проводився на основі даних отриманих під час побудови складових кривих. Виходячи з того, що кількість теплообмінників дорівнює кількості зв'язків між потоками. Для максимального збереження енергії ця величина буда визначатись із співвідношення

$$N_{Tmer} = \sum_{j=1}^M N_j, \quad (1)$$

де  $N_j = NSC_j \times NSH_j$  – кількість зв'язків для кожного інтервалу температур;  $NSC_j$  – кількість холодних потоків в інтервалі  $j$ ;  $NSH_j$  – кількість гарячих потоків в інтервалі;  $M$  – кількість ентальпійних

інтервалів. Поверхня теплообміну, необхідна для рекуперації теплової енергії при мінімальному споживанні зовнішніх енергоносіїв визначалась із складових кривих, які розбивались на вертикальні ентальпійні інтервали в точках залому кривих та обчислювалась поверхня теплообміну, що необхідна для кожного інтервалу, а потім, підсумовуючи, обчислювалась загальна поверхня

$$S_{\min} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{\Delta T_{\ln k}} \left( \sum_{i=1}^I \frac{q_i}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^J \frac{q_j}{\alpha_j} \right), \quad (2)$$

де  $\Delta T_{\ln k}$  – логарифмічна температурна різниця для  $k^{\text{го}}$  інтервалу;  $\alpha_i$  та  $\alpha_j$  – коефіцієнт тепловіддачі  $i^{\text{го}}$  гарячого та  $j^{\text{го}}$  холодного потоку;  $M$  – кількість ентальпійних інтервалів;  $I$  – кількість гарячих потоків;  $J$  – кількість холодних потоків;  $q_{ij}$  – зміна потокової ентальпії  $i^{\text{го}}$  гарячого та  $j^{\text{го}}$  холодного потоку.

Вартість системи теплообмінних апаратів визначається співвідношенням:

$$SS = N_T \left[ a + b \left( \frac{S_{\min}^*}{N_T} \right)^c \right], \quad (3)$$

де  $a$  – вартість установки теплообмінника, з урахуванням автоматики;  $b$  – питома вартість теплообмінної поверхні;  $c \sim 0,8 \div 1$  – показник нелінійності залежності теплообмінної поверхні від її величини.

Вагові коефіцієнти для кожного технологічного потоку визначалися як

$$\varphi_j = \left( \frac{b_B}{b_j} \right)^{\frac{1}{c_B}} \left( \frac{S_{\min}}{N_T} \right)^{1 - \frac{c_j}{c_B}}, \quad (4)$$

де  $b_B$  та  $c_B$  – коефіцієнти для базового теплообмінного обладнання;  $b_j$  та  $c_j$  – коефіцієнти для  $j^{\text{го}}$  потоку. При цьому приймаємо, що вартість інсталяції теплообмінників  $a$  однакова для апаратів всіх типів.

Цільове значення теплообмінної поверхні з урахуванням різної вартості теплообмінного обладнання для кожного технологічного потоку буде визначатися як:

$$S_{\min}^* = \sum_{k=1}^M \frac{1}{\Delta T_{\ln k}} \left( \sum_{i=1}^I \frac{q_i}{\varphi_i \alpha_i} + \sum_{j=1}^J \frac{q_j}{\varphi_j \alpha_j} \right). \quad (5)$$

Аналіз використання гарячих зовнішніх енергоносіїв впроваджувався за допомогою великої складової кривої технологічних потоків. Оригінальна методика побудови великої складової кривої була спеціально розроблена для виконання роботи.

Рис. 2. Визначення теплообмінної поверхні при вертикальному теплообміні.

Для аналізу існуючої системи теплообміну, для визначення неефективно працюючих теплообмінників та для синтезу проекту реконструкції нової теплообмінної системи використовувався метод сіткових діаграм. Метод засновано на незалежному розгляданні та проектуванні теплообмінних підсистем нижче та вище точки пінчу.

Розроблено пакет прикладних програм в середовищі **Fortran Power Station®** інтегровано з пакетом **MathCad®** для автоматичної побудови складових кривих технологічних потоків, великої складової кривої, вартісних залежностей, цільових кривих реконструкції теплообмінних систем та вибору  $\Delta T_{min}$  за заданим критерієм.

Для розрахунку високоефективного теплообмінного обладнання, необхідного для синтезованої теплообмінної системи, використовувалася модернізована методика розрахунку пластинчастих конденсаторів.

**В третьому розділі** "Приклад застосування пінч-аналізу для дослідження системи теплообмінних апаратів при переробці кам'яновугільної смоли" проведено аналіз системи рекуперативного теплообміну при переробці кам'яновугільної смоли на коксохімічному виробництві. Наведено опис системи технологічних потоків та опис технологічної схеми одноколонного трубчастого агрегату. Відокремлено систему технологічних потоків, які можуть бути включені до теплової інтеграції. Зібрані необхідні для аналізу поточкові дані, та визначено їх теплофізичні властивості.

Рис. 3. – Складові криві існуючої системи теплообміну в процесі дистиляції кам'яновугільної смоли та переробки нафталінової фракції на одноколонному трубчастому агрегаті. 1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива;  $Q_{Hmin}$  – теплова потужність гарячих зовнішніх енергоносіїв;  $Q_{Cmin}$  – теплова потужність холодних зовнішніх енергоносіїв.

Рис. 4. – Складові криві системи теплообміну в процесі дистиляції кам'яновугільної смоли та переробки нафталінової фракції для  $\Delta T_{min}=12^{\circ}\text{C}$ . 1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива;  $Q_{Hmin}$  – теплова потужність гарячих зовнішніх енергоносіїв;  $Q_{Cmin}$  – теплова потужність холодних зовнішніх енергоносіїв.

Використовуючи поточкові дані та математичну модель системи рекуперативного теплообміну, розроблену у другому розділі, було побудовано складові криві технологічних потоків існуючого процесу переробки кам'яновугільної смоли (рис. 3).



Складові криві на малюнку 5 показують, що в цьому процесі зовсім відсутня рекуперация теплової енергії. Теплова потужність, яка споживається від гарячих теплоносіїв дорівнює 3923,6 кВт, а потужність, яка відводиться від процесу за рахунок холодних енергоносіїв дорівнює 2064,1 кВт.

Оскільки тепла інтеграція в системі теплообміну відсутня, то проект реконструкції системи можна розглядати, як створення нової системи рекуперации теплової енергії. Для цього були побудовані вартісні залежності і визначено оптимальне значення мінімального температурного напору на теплообмінному обладнанні при заданих вартостях теплообмінного обладнання та теплової енергії для нагріву та охолодження.

Визначено, що оптимальне значення мінімального температурного напору на теплообмінному обладнанні в системі теплообміну при дистиляції кам'яновугільної смоли дорівнює  $12^{\circ}$ . Виходячи з цього були побудовані складові криві технологічних потоків для  $\Delta T_{min}=12^{\circ}\text{C}$  (рис. 4), і визначені цільові значення теплової енергії, локалізація точки пінчу та температури пінчу на гарячій та холодній складовій кривій. При цьому споживання гарячих теплоносіїв складатиме  $Q_{Hmin} = 2085$  кВт, а холодних –  $Q_{Cmin} = 225,5$  кВт.

Побудована сіткова діаграма системи теплообміну процесу переробки кам'яновугільної смоли, яка відповідає складовим кривим для  $\Delta T_{min}=12^{\circ}\text{C}$  та визначено позиції на яких можуть бути використані пластинчасті теплообмінні апарати.

Базуючись на розробленій сітковій діаграмі була побудована принципіальна схема інтегрованого процесу переробки кам'яновугільної смоли на коксохімічному підприємстві. При цьому споживання теплової енергії від гарячих енергоносіїв зменшується на 47%, а тепла потужність яка відводиться холодними енергоносіями зменшується на 89%.

**У четвертому розділі** " Приклад застосування пінч-аналізу для дослідження системи теплообмінних апаратів при виробництві цукру" визначено енергоспоживання хіміко-технологічної системи при виробництві цукру. Наведено опис існуючого процесу виробництва цукру, ідентифіковані технологічні стадії та обладнання, які на цей час використовуються. Зібрані та проаналізовані дані технологічних потоків. Відокремлено гарячі та холодні технологічні потоки, які можуть бути включені до теплової інтеграції і які будуть використані під час аналізу існуючої системи теплообміну. Визначено теплофізичні властивості цих потоків. Це дозволило скласти потокову таблицю, на основі якої проводився подальший аналіз. Відокремленні технологічні потоки були зображені на сітковій діаграмі як популяція потоків у температурних інтервалах.

На сітковій діаграмі було розташовано теплообмінне обладнання згідно з технологічною схемою. Складено матеріальний та тепловий баланс існуючою випарної станції. Завдяки цьому була складена збалансована сіткова діаграма теплообмінної системи цукрового виробництва.

Аналіз поточкових даних та сіткових діаграм показав, що мінімальна температурна різниця між потоками в теплообмінному обладнанні складає  $8,5^{\circ}\text{C}$  і локалізується на другому корпусі випарної станції. Сіткова діаграма що побудована зі вказаним  $\Delta T_{min}$  представлена на (рис. 5). За допомогою цього вдалося визначити неефективно працюючі теплообмінні апарати. Це теплообмінники, які переносять теплову енергію через пінч. Визначено, що енергоспоживання існуючої схеми складає 51500 кВт. Це відповідає 68,4 кг ретурної пари на 100 кг переробляемого буряку. Це значення набагато перевищує аналогічний показник європейських цукрових заводів, яке дорівнює  $\sim 40$  кг пари на 100 кг буряку. Цей показник ще більш відмінний від споживання пари на заводах, що використовують пластинчасті випарні апарати. На цих підприємствах споживання пари дорівнює 25 кг пари на 100 кг буряку.

Рис. 5. Сіткова діаграма існуючої системи теплообміну з указуванням пінч-температур. T1-T9 – рекуперативні теплообмінні апарати; Н – утилітний теплообмінник; K1-K4 – корпуси випарної станції; ДА – дифузійний апарат; БК – барометричний конденсатор; С – вказує на теплоту, що відводиться від процесу; № – номер потоку; СР – потокова теплоємність;  $\Delta H$  – зміна потокової ентальпії; цифри під розміщенням обладнання вказують на теплове навантаження, кВт

Відповідно до методики, викладеної в розділі 2 та величиною існуючих гарячих утиліт, побудовано складові криві технологічних потоків існуючого технологічного процесу (рис. 6).

Рис. 6. Складові криві для існуючої системи теплообміну. 1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива;  $\Delta T_{min}$  – мінімальний температурний напір на теплообмінному обладнанні;  $Q_{Hmin}$  – величина гарячих утиліт;  $Q_{Cmin}$  – теплова потужність, яка відводиться від процесу.

Для визначення оптимального значення  $\Delta T_{min}$  були побудовані залежності: капітальних витрат, вартості енергії та загальної наведеної вартості проекту від  $\Delta T_{min}$ . При цьому вартість гарячих утиліт приймалася 130 у.о. за 1 кВт-рік, а холодних – 20 у.о. за 1 кВт-рік. Капітальні витрати оцінювалися за наступним законом вартості трубчастих теплообмінних апаратів:

$$CC = B + A \cdot S^{0.87}, \quad (6)$$

де  $B$  – вартість встановлення апарату, що дорівнює 15 000 у.о. для випарних апаратів та 2 000 у.о. для теплообмінників;  $A$  – коефіцієнт вартості  $1\text{ м}^2$  теплообмінної поверхні, що дорівнює 2 000 у.о. для випарних апаратів і 150 у.о. для теплообмінників,  $S$  – площа поверхні теплообміну,  $\text{м}^2$ .

Для визначення загальної площі поверхні теплообмінних апаратів використовувалися результати, отримані при побудові складових кривих технологічних потоків. Наведені капітальні витрати визначались за умови п'ятирічного кредиту з фіксованою кредитною ставкою 10%. Зауважимо також, що при визначенні наведених капітальних витрат, кількість теплообмінних апаратів вираховуємо за співвідношенням для мінімальної їх кількості.  $N-1$  без розділу на пінче, де  $N$  – загальна кількість інтегруємих потоків.

В результаті було доведено, що найменше значення загальної наведеної вартості дорівнює  $2,5^\circ\text{C}$ , тобто менш ніж в наш час (рис. 7). Це говорить про те, що існує можливість зниження споживання теплової енергії в даному виробництві цукру не тільки за рахунок усунення переносу енергії через пінч, але й за рахунок зменшення  $\Delta T_{\min}$  в системі теплообміну підприємства.

Рис. 7. Вартісні криві для технологічних потоків які інтегровані в теплову систему цукрового заводу. 1 – зведені капітальні витрати; 2 – зведена вартість енергії; 3 – загальна зведена вартість теплообмінної системи;  $\Pi$  - зведена вартість;  $\Delta T_{\min}$  – мінімальний температурний напір на теплообмінному обладнанні.

На основі складових кривих були побудовані цільові криві реконструкції з розташуванням існуючої теплообмінної поверхні. Це показало, що на цей час площа теплообмінної поверхні більш ніж на 50% перевищує мінімальну поверхню, необхідну для здійснення максимальної рекуператії теплової енергії в розглянутій системі потоків. Але при цьому рекуперується потужність на 7,1 МВт менша, ніж у випадку повної інтеграції системи потоків, що розглядається.

За допомогою інструменту сіткової діаграми синтезована теплообмінна система для підприємства переробки цукрового буряку для визначеного цільового значення  $\Delta T_{\min}$ .

При створенні проекту реконструкції системи теплообміну в теплову інтеграцію було включено потік конденсату ретурної пари. Цього раніше не було описано в літературі. Однак пряма інтеграція конденсату ретурної пари в систему теплообміну за допомогою традиційних методів пінч-аналізу не можлива. Для вирішення цієї задачі було розроблено метод, що дозволяє коректно інтегрувати потік конденсату ретурної пари в теплову систему цукрового заводу. Для цього розглядаються складові криві при  $\Delta T_{\min}=2,5^\circ\text{C}$  без врахування потоку конденсату та визначаються значення гарячих утиліт  $Q_{H\min}$ . Ця величина розглядалася як складова утиліта. При цьому необхідно враховувати, що гарячі утиліти використовуються тільки вище пінча. Це дозволило розрахувати масову витрату конденсату ретурної пари. Використовуючи це була побудована крива реконстру-

кції, яка показує, що існуюча поверхня теплообміну на 50% вище за цільове значення при вертикальному теплообміні в температурних інтервалах. Це відбувається за рахунок великого перехресного теплообміну.

Рис. 8. Складові криві побудовані для  $\Delta T_{min}=2,5^{\circ}\text{C}$  з урахуванням конденсату ретурної пари. 1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива;  $Q_{Hmin}$  – величина гарячих утиліт.

Використовуючи розроблений метод, побудовані складові криві для  $\Delta T_{min}=2,5^{\circ}\text{C}$  (рис. 8). Аналіз складових кривих ілюструє, що споживання теплової потужності складає 42770 кВт, що на 17% менш ніж у існуючому процесі. Використовуючи дані, отримані при побудові складових кривих, була розроблена сіткова діаграма проекту реконструкції теплообмінної системи сахарного заводу. При цьому застосовувалися принципи пінч-проекування оптимальних теплообмінних систем промислових підприємств. Споживання теплової енергії від гарячих утиліт в розробленій теплообмінній системі з інтеграцією конденсату ретурної пари буде на 8276 кВт менш потужності, яка споживається зараз. Це призводить до економії 268970 у.о. на рік, з урахуванням чотирьохмісячного терміну переробки буряку.

**В п'ятому розділі** “Високоєфективне теплообмінне обладнання для інтегрованих хіміко-технологічних процесів” виконані розрахунки та вибране високоєфективне теплообмінне обладнання для запропонованої схеми теплообмінних апаратів при переробці кам'яновугільної смоли та виробництві цукру.

Модернізована методика розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів була розроблена на кафедрі інтегрованих технологій процесів та апаратів Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" при безпосередній участі здобувача. Застосовуючи цю методику та вихідні дані розроблених систем теплообміну, які відповідають сітковим діаграмам, були розраховані та обрані пластинчасті теплообмінні апарати.

В системі рекуперативного теплообміну при виробництві цукру теплообмінні апарати  $T_1$ ,  $T_{12}$ ,  $T_9$  та  $H$  розташовані у безпосередній близькості від точки пінчу, де  $\Delta T_{min}=2,5^{\circ}\text{C}$ , запропоновано використовувати пластинчасті теплообмінні апарати які можуть задовольнити даний перепад температур. В якості решти обладнання запропоновано використовувати наявні теплообмінні апарати. В таблиці 1 наведені дані теплообмінних апаратів, які використовуються в проекті реконструкції теплообмінної системи цукрового заводу.

Характеристики теплообмінних апаратів для проекту реконструкції системи теплообміну цукрового заводу.

Теплообмінник	Потужність, кВт	Гарячий теплоносій			Холодний теплоносій			Оцінка поверхні теплообміну, м <sup>2</sup>
		№ потоку	T <sub>s</sub> , °C	T <sub>T</sub> , °C	№ потоку	T <sub>s</sub> , °C	T <sub>T</sub> , °C	
T1	6387	1	124,5	124,5	17,1	89	122	108
ДА	6413	2	115	115	12	45	66	
T3	3151	2	115	115	14	80	90	56
T4	1622	2	115	115	15	80	95	32
T5	2943	2	115	115	16	80	95	58
T6	713	2	115	115	13	51	53	12
T7	400	2	115	115	22	68,5	82	42
T8	10000	3	105	105	13	53	85	293
T9	1681	4	95	95	17,1	80	89	35
T10	4536	5	120	64	11	42	68	55
БК	4503	10	76	42	24	15	42	
T12	446	9	130	124,5	17,1	122	124,3	18
Н	333	пар	132	132	17,1	124,3	126	11

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-практичної задачі розробки ефективних систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. В процесі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблені такі висновки:

1. Розроблена математична модель системи рекуперативного теплообміну в хіміко-технологічних процесах з фазовими перетвореннями потоків. Удосконалена методика побудови складових кривих технологічних потоків і великої складової кривої, яка дозволяє аналізувати потоки з фазовими змінами.

2. Досліджена хіміко-технологічна система та система зовнішніх енергоносіїв за допомогою методів пінч-аналізу. Визначено значення теплової енергії, що споживається хіміко-технологічним процесом та значення  $\Delta T_{min}$  на теплообмінному обладнанні.

3. Визначено структуру системи рекуперативного теплообміну та ідентифіковано неефективно розташовані теплообмінні апарати.

4. Визначено  $\Delta T_{min}$  між потоками на теплообмінному обладнанні, при якому загальна наведена вартість системи теплообмінних апаратів – мінімальна.

5. Синтезована система теплообмінних апаратів з урахуванням складової зовнішньої утиліти для визначеного  $\Delta T_{min}$  з використанням методів пінч-аналізу, яка дозволяє суттєво зменшити споживання зовнішніх енергоносіїв. Для синтезованих систем теплообмінних апаратів проведено розрахунки високоефективних пластинчастих теплообмінників.

6. Удосконалена методика розрахунку пластинчастих теплообмінників. Визначено економічний ефект від впровадження запропонованих систем теплообмінних апаратів та пластинчастих теплообмінників для виробництв, що аналізувалися. Строк окупності проектів реконструкції систем теплообміну не перевищує 1 року.

7. Розроблено пакет прикладних програм в середовищі Fortran Power Station®, інтегровано з пакетом MathCAD® для автоматичної побудови складових кривих технологічних потоків, великої складової кривої, вартісних залежностей, цільових кривих реконструкції та вибору  $\Delta T_{min}$  в теплообмінній системі за заданим критерієм.

8. Впроваджено теплообмінне обладнання для розробленої системи теплообміну на підприємстві цукровий завод АО "КАНТ", (м. Тараз, Казахстан). Впроваджено методику розрахунків пластинчастих теплообмінників для проектування нового обладнання в АТ "Співдружність – Т" (м. Харків).

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Перевертайленко А.Ю., Болдырев С.А., Рубчевский В.Н., Волох В.М. Анализ потенциала энергосбережения в процессе дистилляции каменноугольной смолы. // Интегрированные технологии та энергосбережения. - Харків: НТУ "ХПІ", – 2001. №2.– С. 16 – 22.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження системи технологічних потоків при дистилляції кам'яновугільної смоли шляхом побудови складових. Досліджено залежність споживання теплової енергії від мінімального температурного напору на теплообмінному обладнанні.

2. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Улучшение тепловой интеграции на сахарных заводах // Интегрированные технологии та энергосбережения. - Харків: НТУ "ХПІ", – 2002. № 2.– С. 11 – 16.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження системи теплообмінних апаратів при виробництві цукру і визначено енергозберігаючий потенціал процесу переробки цукрового буряку.

3. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Тепловая интеграция и энергосбережение в сахарной промышленности // Вісник Національного технічного університету "ХПІ".- Харків: НТУ "ХПІ" – 2002. Вип. 9. Т. 1. – С. 94 – 105.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження системи рекуперації теплової енергії на прикладі виробництва цукру і наведено визначення мінімального температурного напору в системі теплообмінних апаратів.

4. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А., Бухкало С.И., Кауфман С.И. Определение потенциала энергосбережения процесса дистилляции каменноугольной смолы и

процесса переработки нафталиновой фракции на авдеевском КХЗ // Интегровані технології та енергозбереження. - Харків: НТУ "ХПІ", – 2003, №2.– С. 23-30.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження технологічного процесу переробки кам'яновугільної смоли на двоколонному трубчастому агрегаті та визначено залежності загальної наведеної вартості системи теплообмінних апаратів від мінімального температурного напору.

5. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Создание оптимальной теплообменной системы в процессе дистилляции каменноугольной смолы // Интегровані технології та енергозбереження. - Харків: НТУ "ХПІ", – 2004, №2.– С. 85 – 90.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження процесу переробки кам'яновугільної смоли та розроблено систему теплообмінних апаратів для рекуперації теплової енергії при заданих початкових умовах.

6. Болдырев С.А. Методы энергосбережения в сахарной промышленности (обзор). // Интегровані технології та енергозбереження. - Харків: НТУ "ХПІ", – 2007, №2. С. 28 – 33.

Здобувачем проведено теоретичні дослідження теплообмінних систем підприємств цукрової промисловості, визначено недоліки та переваги методів реконструкції хіміко-технологічних систем та теоретично обґрунтовано використання пінч-аналізу для зниження споживання зовнішніх енергоносіїв.

7. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Улучшение тепловой интеграции на сахарных заводах. // Электронный журнал энергосервисной компании "Экологические системы". – 2005, №7. [http://www.esco-ecosys.narod.ru/2005\\_7/art86.htm](http://www.esco-ecosys.narod.ru/2005_7/art86.htm).

Здобувачем проведено експериментальні дослідження хіміко-технологічної системи підприємства переробки цукрового буряку і визначено топологію системи теплообмінних апаратів при ефективній реконструкції підприємства.

8. Tovazhnyanski L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyryev S.A. Heat Integration Improvement for Eastern European Countries Sugar-Plant // Proceedings of 15<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'2002, Prague, 2002, Summaries Vol. 4. System Engineering. Prague. 2002. P. 251. (Paper No. P5. 69. p. 19.).

Здобувачем проведено експериментальні дослідження в технологічному процесі отримання білого цукру, розглянуто можливість покращення рекуперації і зменшення споживання зовнішніх енергоносіїв.

9. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Перевертайленко А.Ю., Болдырев С.А. Прогноз снижения выбросов CO<sub>2</sub> при улучшении тепловой интеграции на сахарных заводах Северо – Восточной Украины // Збірка доповідей IV Всеукраїнської науково-методичної конференції з міжнародною участю “Екологія інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”. – Дніпродзержинськ. - 2002. С. 16 – 18.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження систем теплообмінних апаратів на прикладі підприємств цукрової промисловості північно-східної України та отримано залежності енергоспоживання та величини шкідливих викидів при використанні методів пінч-аналізу.

10. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Снижение потребления коксового газа при тепловой интеграции процесса на двухколонном агрегате дистилляции каменноугольной смолы // Збірка доповідей IV Всеукраїнська науково-методична конференція з міжнародною участю “Екологія інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”. – Дніпродзержинськ. –2002. – С. 219 – 221.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження технологічної системи переробки кам'яновугільної смоли, отримані залежності зниження споживання коксового газу при реконструкції за допомогою пінч-аналізу та розроблено теплообмінну систему з мінімальним споживання теплової енергії.

11. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Болдырев С.А. Экономически оптимальная тепловая интеграция на сахарных заводах // Материали Междунар. Научн. – практ. конф. “Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности”. – Москва. – 2002. – С.3.2-1.1.4.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження технологічного процесу отримання цукру, отримані показники оптимальної системи теплообмінних апаратів підприємства та порівняно їх із існуючим виробництвом.

12. L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, L.M. Ulyev, A.Yu. Perevertlyenko, S.A. Boldyryev, A.S. Demirskiy. Energy saving and emission reduction at the sugar-plant with take into account of condensate heat of return steam in process integration L. // Proceedings of 16<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA'2004)., Summaries - System Engineering. - Prague, 2004. Vol. 4. p. 251. (Paper No. P5. 69).

Здобувачем проведено експериментальні дослідження хіміко-технологічної системи при виробництві цукру, розроблено проект реконструкції системи теплообмінних апаратів підприємства з включенням до теплової інтеграції конденсату ретурної пари та розраховано теплообмінне обладнання яке повинно забезпечувати необхідний режим.

13. P.O. Kapustenko, G.L. Khavin, A.Y. Perevertaylenko, S.A.Boldyryev. Compact heat exchangers for phosphoric acid production. // Proceedings of 17th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA'2006). Summaries - System Engineering. - Prague. 2006. Vol. 4. P. 1329. (Paper No. P.5.083).

Здобувачем проведено експериментальні дослідження компактних теплообмінників та удосконалена методика розрахунків пластинчастих теплообмінних апаратів.



## АНОТАЦІЯ

Болдирєв С.О. Теоретичні та експериментальні дослідження ефективних систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології; Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти та науки України, Харків, 2008.

Дисертація присвячена науково обґрунтованому аналізу систем теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах та створенню проекту реконструкції теплообмінної системи з використанням високоефективного теплообмінного обладнання на прикладі коксохімічного виробництва та виробництва цукру.

Вперше за допомогою методів пінч-аналізу досліджено систему теплообмінних апаратів в хіміко-технологічних процесах. Розроблено метод побудови складових кривих технологічних потоків і великої складової кривої який дозволяє аналізувати потоки з фазовими змінами. Встановлено, що споживання теплової енергії виробництв, що аналізувалися на 30-50% перевищує середньоєвропейські показники. Виявлені недоліки систем теплообмінних апаратів та неефективно розташовані теплообмінники виробництв, що аналізувалися. Визначено оптимальне значення  $\Delta T_{min}$  для систем теплообмінних апаратів, що аналізувалися та цільові значення споживання теплової енергії технологічним процесом.

Синтезовані принципові технологічні схеми систем теплообмінних апаратів, які відповідають вимогам до проектування оптимальних теплообмінних систем. Модернізовано методику розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів. Для отриманих схем розраховано високоефективні пластинчасті теплообмінники, що дозволяють забезпечити необхідний температурний режим. Пластинчастий теплообмінник впроваджено в систему рекуперативного теплообміну цукрового заводу АО "КАНТ", Казахстан, м. Тараз.

Доведено, що споживання теплової енергії технологічними процесами виробництв, що аналізувалися, при впровадженні проектів реконструкції системи теплообмінних апаратів знижується на величину до 47%. Строк окупності запропонованих проектів реконструкції систем теплообмінних апаратів не перевищують 1 року.

Ключові слова: хіміко-технологічний процес, система теплообмінних апаратів, пластинчасті теплообмінники, складові криві технологічних потоків, рекуперация, сіткова діаграма, пінч-аналіз.

## АННОТАЦИЯ

Болдырев С.А. Теоретические и экспериментальные исследования эффективных систем теплообменных аппаратов в химико-технологических процессах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2008.

Диссертация посвящена научно обоснованному анализу систем теплообменных аппаратов в химико-технологических процессах. и созданию проекта реконструкции теплообменной системы с использованием высокоэффективного теплообменного оборудования на примере коксохимического производства и производства сахара.

Впервые при помощи методов пинч-анализа исследована система теплообменных аппаратов в химико-технологических процессах. Разработан метод построения составных кривых технологических потоков и большой составной кривой, позволяющий анализировать потоки с фазовыми изменениями. Установлено, что потребление тепловой энергии анализируемых производств на 30-50% превышает среднеевропейские показатели. Выявлены недостатки систем теплообменных аппаратов и неэффективно расположенные теплообменники анализируемых производств. Определено оптимальное значение  $\Delta T_{min}$  анализируемых систем теплообменных аппаратов и целевые значения потребления тепловой энергии технологическим процессом.

Синтезированы принципиальные технологические схемы систем теплообменных аппаратов, которые отвечают требованиям к проектированию оптимальных теплообменных систем. Модернизирована методика расчета пластинчатых теплообменных аппаратов. Для полученных схем рассчитаны и выбраны пластинчатые теплообменники, которые позволяют обеспечить необходимый температурный режим. Пластинчатый теплообменник установлен в системе рекуперативного теплообмена сахарного завода АО «КАНТ», Казахстан г. Тараз.

Показано, что потребление тепловой энергии технологическими процессами анализируемых производств, при внедрении проектов реконструкции систем теплообменных аппаратов, снижается на величину до 47%. Срок окупаемости предлагаемых проектов реконструкции не превысит 1 года.

Ключевые слова: химико-технологический процесс, система теплообменных аппаратов, пластинчатые теплообменники, составные кривые технологических потоков, рекуперация, сеточная диаграмма, пинч-анализ.

## SUMMARY

Boldyryev S.A. Theoretical and experimental investigations of effective heat exchange systems in chemical-technological processes. – Manuscript.

A dissertation for the scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2008.

The case studies for sugar plant and coal tar refining process were carried out. Process integration methods for analysis of heat exchanger network and utility systems were used. Original methodic for composite curve plotting is developed. The bottlenecks in heat network of plant were found. The retrofit design for heat exchanger network is proposed and the methods for debottlenecking were shown. The realization of these projects allows to decrease the specific energy consumption on 47%. Methodic for plate heat exchangers calculation was updated. Plate heat exchangers for retrofit projects were calculated and selected. Pay back period for retrofit projects do not exceed 1 year.

Keywords: chemical-technological process, heat exchanger network, plate heat exchangers, composite curves of technological streams, heat recovery, grid diagram, pinch analysis.