

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Арсеньєва Ольга Петрівна

УДК 66.048.28.001

**ПАРОВІ ПЛАСТИНЧАСТІ ТЕПЛОБМІННИКИ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси й обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі загальної хімічної технології, процесів та апаратів Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор Товажнянський Леонід Леонідович, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедри ЗХТ, П та А НТУ „ХПІ”

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Фокін Віталій Сергійович, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри загальної теплотехніки

кандидат технічних наук Данилов Юрій Борисович, Український науково-дослідницький інститут хімічного машинобудування, м. Харків, заступник директора з наукової роботи

Провідна установа: Науково-дослідницькій та проектний інститут хімічних технологій Державного комітету промислової політики України, м. Сєверодонецьк.

Захист відбудеться „___” _____ 2004 року о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий „___” _____ 2004 року.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05

Тимченко В.К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергозбереження визначене як один із пріоритетних напрямків державної політики України, що повинне реалізовуватися як довгострокова програма. У промисловості цією програмою передбачається поступова реконструкція технологічних процесів, та заміна існуючої (як правило, енергоємної) системи енергопостачання на енергозберігаючу. Хімічна промисловість є однією з енергоємних галузей, технологічні процеси в якій характеризуються істотними потоками вторинної пари. У цьому зв'язку енерго-ефективні заходи доцільно розглядати з точки зору рішення питань удосконалення теплотехнологічних процесів та впровадженням устаткування для утилізації пари. Пластинчасті теплообмінні апарати (ПТА) по ряду своїх тепло-гідравлічних і експлуатаційних характеристик перевершують апарати кожухотрубного типу, однак широке впровадження пластинчастих паро-водяних теплообмінників стримується їх істотною вартістю, що визначає капітальні витрати на енерго-ефективну реконструкцію і термін окупності. У той же час існують методи розрахунку і вибору пластинчастих теплообмінних апаратів, особливо для процесів з фазовим переходом, дають невиправдано завищені значення площі теплопередаючої поверхні, а відповідно, і витрат на теплообмінник. З іншого боку, ті парові теплообмінні апарати, що вже експлуатуються, з часом починають споживати більше гріючого теплоносія, що знижує ефективність використання пластинчастого теплообмінного апарату і збільшує термін окупності. Тому задача дослідження процесу конденсації пари на гофрованій поверхні пластин пластинчастого теплообмінного апарата й експлуатаційних характеристик для підтримки енерго-ефективності високого рівня є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі загальної хімічної технології, процесів і апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» з тематики: енергозбереження на промислових підприємствах. Здобувач як виконавець брав участь у держбюджетній темі «Теоретичні основи енергозберігаючої інтеграції процесів і технології зменшення шкідливих викидів для промислових підприємств».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення теплових і експлуатаційних характеристик пластинчастих конденсаторів для удосконалення теплотехнологічних процесів підприємств хімічної промисловості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розвинути методика розрахунку парового пластинчастого конденсатора для утилізації теплоти пари з урахуванням особливостей процесу конденсації на вертикальній гофрованій пластині.

2. Розробити фізичну модель процесу конденсації на вертикальній гофрованій пластині в умовах ламінарного руху пари.
3. Експериментально дослідити тепло-гідравлічні характеристики для визначення тепловіддачі пластин як функції геометричного параметра гофр для варіантних конструкторських розробок установлюваних ПТА.
4. Дослідити експлуатаційні характеристики і показники ПТА для удосконалення їх застосування у теплотехнологічних процесах й оцінити економічну ефективність застосування енергозберігаючих заходів з урахуванням експлуатаційної надійності ПТА.

Об'єкт дослідження – процес теплопереносу від пари, що конденсується до охолоджуючого теплоносія.

Предмет дослідження – теплопередача у пластинчастих конденсаторах з гофрованою поверхнею пластин.

Методи дослідження. Фізичне і математичне моделювання процесу конденсації пари на вертикальній гофрованій поверхні ПТА. Дослідження процесу конденсації здійснювалося на основі аналітичного методу з урахуванням властивостей дисперсно-кільцевої та кільцевої моделей конденсації. Тепло-гідравлічні характеристики ПТА встановлювалися експериментально зі застосуванням методів теплофізичного експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалася на основі критеріально-структурного методу.

Наукова новизна отриманих результатів:

- одержала подальший розвиток класифікація парових пластинчастих конденсаторів, застосовуваних у технологічних процесах, у тому числі для утилізації теплоти пари;
- отримано співвідношення для оцінки шару конденсату для вертикальної гофрованої поверхні за умови ламінарного руху пари, що дозволяє оцінювати термічний опір теплопередачі при конденсації пари;
- вперше отримане критеріальне рівняння тепловіддачі для пластин із синусоїдальним профілем гофр, що включає геометричний параметр, який дозволяє проводити варіантні конструкторські пророблення;
- одержала подальший розвиток теорія розрахунку парових пластинчастих конденсаторів на основі запропонованої позонної методики, що дозволяє враховувати зміни швидкості пари в теплообмінному апараті;
- розвинуто підхід до оцінки надійності пластинчастих теплообмінних апаратів для утилізації теплоти вторинної пари, застосування якого забезпечує задану імовірність безвідмовної роботи пластинчастого теплообмінного апарата.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтованому виборі пластинчастих теплообмінних апаратів при удосконаленні теплотехнологічних процесів на

хімічних підприємствах та забезпеченні енерго-ефективної роботи ПТА шляхом упровадження графіка експлуатації.

Особистий внесок здобувача.

Особисто автором розроблена модель конденсації пари на вертикальній гофрованій поверхні при ламінарному режимі руху; розроблені методика і проведені експериментальні дослідження з визначення теплогідравлічних характеристик пластинчастих конденсаторів; отримане критеріальне рівняння тепловіддачі для пластин із синусоїдальним профілем, яке включає геометричний параметр, що дозволяє проводити варіантні конструкторські пророблення; удосконалена інженерна методика розрахунку і вибору парових теплообмінних апаратів; отримані результати, що дозволили оцінити вплив забруднення теплопередаючої поверхні пластинчастого теплообмінного апарату на його експлуатаційні характеристики, на основі чого розроблені графіки енерго-ефективної експлуатації ПТА з резервуванням.

Апробація результатів дисертації:

Матеріали дисертації доповідалися на міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані технології й енергозбереження» ІТЕ'2002, 2003 (м. Харків, 2002 та 2003 р.); науково-технічній конференції «Комунальне господарство міст» (м. Харків, 2003); 15-й міжнародній конференції CHISA'2002 (Прага, 2002); □53-й міжнародній конференції „Canadian Chemical Engineering Conference, CChE'2003” (Торонто, 2003); на науково-технічному семінарі кафедри загальної хімічної технології, процесів і апаратів НТУ „ХП” (2001 – 2003 р.).

Публікації. Основний зміст роботи викладений у 10 наукових працях, 6 з яких опубліковані у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків та 5 додатків. Повний обсяг дисертації 130 сторінок; з них 20 ілюстрацій по тексту, 6 ілюстрацій на 5 сторінках; 2 таблиці; 5 додатків на 17 сторінках, список використаних джерел із 102 найменування на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і задачі дослідження, викладена наукова новизна, зв'язок роботи з науковими програмами, приведена практична значимість роботи і перераховані застосування результатів дослідження.

Перший розділ присвячений огляду й аналізу робіт з дослідження тепловіддачі і гідродинаміки в теплообмінниках, у яких одним з теплоносіїв є водяний пар. Проаналізовано моделі і методи розрахунку теплообміну при конденсації.

Виконано огляд робіт з тепловіддачі пари, що конденсується. З їх аналізу можна зробити висновок, що на сучасному етапі на передній план починають виступати прямі залежності між

інтенсивністю тепловіддачі і геометричних параметрів поверхні, що особливо кошовно для практичного варіантного проектування. При цьому варіантне проектування припускає вибір кращого з наявних реальних рішень. Тобто, з декількох наявних технічних рішень вибирається те, котре відповідає ознакам доцільності, технологічності, економічності, умовам експлуатації й іншим, і, таким чином, є раціональним. Надано огляд і аналіз пластинчастих конденсаторів, що дозволило розвинути існуючу класифікацію. Для задоволення перерахованих вимог до конденсатора, з урахуванням приведеної класифікації по теплофізичних умовах використання конденсаторів була розроблена класифікація конструктивного виконання конденсаторів. Проведений аналіз робіт з теплообміну і гідродинаміки при русі потоку уздовж гофрованої поверхні.

Проаналізовано теоретичні дослідження процесів конденсації. В основному дослідження вчених присвячені описові кінетики утворення краплі й одержанню рівняння швидкості конденсації. Розглядаються процеси краплинної конденсації і рівняння, що їх описують. Однак у промислових конденсаторах процеси краплинної конденсації спостерігаються тільки при пуску теплообмінників, після чого процес росту краплі завершується їхнім злиттям, і, таким чином, починається плівкова конденсація в режимі якої і працюють теплообмінники-конденсатори. Розглянуто теплообмін при плівковій конденсації. Опис процесу базується на рішенні задачі конденсації для нерухокої чистої насиченої пари на ізотермічній вертикальній поверхні. Розглянуто процеси конденсації на опуклій криволінійній поверхні. З огляду та аналізу зроблено висновок, що висота гофр не є самостійним параметром, що визначає процес конденсації, однак побічно цей параметр визначає конструктивне рішення поверхні разом із кроком гофр і іншими розмірами поверхні.

В **другому розділі** розроблено удосконалену методику розрахунку пластинчастих парових теплообмінників, що враховує зміну швидкості руху пари вздовж каналів при розрахунку теплообмінного апарата.

Виділено основні фактори, що впливають на процес конденсації. Встановлено, що найбільш істотну роль грає швидкість руху пари. Рух пари впливає на лінію розподілу фаз, прискорюючи або сповільнюючи плин плівки. Якщо пара рухається вниз, то швидкість плівки збільшується, товщина її зменшується, і інтенсивність теплообміну зростає.

У залежності від швидкості пари розглянуто дві моделі конденсації: дисперсно-кільцева (для швидкого руху пари при $Re_n > 4000$) і кільцева (для повільного руху пари при $Re_n \leq 4000$) (рис. 1).

На підставі одномірної теорії руху і конденсації пари розвинуто модель процесу конденсації пари. Якщо розглядати процес конденсації пари на елементарній ділянці приведеної довжини dz теплопередаючій поверхні теплообмінника, то рівняння балансів тепла і маси мають вигляд:

$$G_x c_x dt_x = - \left(\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{1}{K_{ohl}} \right)^{-1} \cdot (t_f - t_x) dF \quad (1)$$

$$r_s dG_s - dQ_{pl} = - \left(\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{1}{K_{ohl}} \right)^{-1} \cdot (t_f - t_x) dF \quad (2)$$

де G_x, G_s – масова витрата теплоносія, що нагрівається, і пари кг/с;
 c_x, c_s – теплоємність теплоносія, що нагрівається, і пари Дж/кг⁰С;
 t_x, t_f – температура теплоносія, що нагрівається, і фазового переходу пари в конденсат ⁰С;
 α_{pl} – коефіцієнт тепловіддачі з боку плівки конденсату, Вт/(м²°С);
 K_{ohl} – коефіцієнт теплопередачі від стінки пластини до теплоносія, що нагрівається Вт/(м²°С);
 F – площа теплопередаючої поверхні, м²;
 r_s – питома теплота фазового перетворення, Дж/кг;
 Q_{pl} – тепловий потік від плівки конденсату, Дж.
Коефіцієнт теплопередачі від стінки пластини до теплоносія, що нагрівається, можна представити у вигляді:

$$K_{ohl} = \left(\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \sum R_f + \frac{1}{\alpha_x} \right)^{-1}, \quad (3)$$

де δ_w – товщина пластини, м;
 λ_w – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини, Вт/(м⁰С);
 $\sum R_f$ – термічний опір тепловому потокові забруднення стінки, (м²°С)/Вт;
 α_x – коефіцієнт тепловіддачі з боку теплоносія, що нагрівається, Вт/(м²°С).

Площа теплопередаючої поверхні F є функцією незалежної перемінної z , що описує приведену довжину теплопередаючої поверхні, і визначається співвідношенням:

$$dF = n_{he} \cdot \frac{2 \cdot f}{d_{eq}} \cdot dz \quad (4)$$

де n_{he} – кількість пластин, що утворюють теплопередаючу поверхню;
 f – площа поперечного перерізу каналу, м²;
 d_{eq} – еквівалентний діаметр каналу, м.

Тепловий потік від плівки конденсату Q_{pl} :

$$Q_{pl} = -c_{pl} (G_{s0} - G_s) dt_f \quad (5)$$

де c_{pl} – теплоємність конденсату, Дж/кг К;

G_{s0} – масова витрата пари на вході в теплообмінник, кг/с.

Система диференціальних рівнянь (1) – (2) з початковими умовами по температурі і витраті сукупно з обмеженнями по гідравлічному опору вирішується для встановлення мінімального значення величини n_{he} – числа пластин в апараті.

Дисперсно-кільцева модель передбачає, що теплообмінний апарат складається з набору стандартних пластин, що утворюють однотипні канали. Тепло переніс у них характеризується середніми значеннями коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі, що входять у рівняння (1) – (5).

Коефіцієнт тепловіддачі визначається зі співвідношення:

$$\frac{\alpha_{pl} \cdot d_{eq}}{\lambda_{pl}} = A \cdot Re_{pl}^n \cdot Pr_{pl}^{0,43} \sqrt{1 + x(\rho_{pl} / \rho_s - 1)} \quad (6)$$

де Re_{pl} – число Рейнольдса, розраховане по повній витраті парожидкістній суміші і в'язкості рідкої фази;

x – масовий паровміст;

ρ_{pl}, ρ_s – щільність рідкої фази і пари відповідно, кг/м³;

Pr_{pl} – число Прандтля, розраховане для рідкої фази.

Чисельне рішення поставленої задачі здійснювалося наступним чином. Представимо приведену довжину каналу (пластини) як сукупність малих ділянок кінцевої довжини Δz . На кожній з ділянок основні параметри процесу змінюються лінійно, а коефіцієнти тепло- і масовіддачі постійні і рівні їхнім середнім значенням. Значення витрат обох теплоносіїв, їх початкові і кінцеві температури, припустимі втрати напору задані. Для першої ділянки, що збігає з входом пари в теплообмінник і виходом теплоносія, що нагрівається, приймається $t_f=t_{11}$, $t_x=t_{22}$, $dQ_{pl}=0$. Модель вирішується методом послідовних наближень. до отримання мінімальної поверхні.

Кільцева модель теплопередачі при конденсації пари з малою швидкістю припускає наступні основні допущення:

- розглядаються чисті поверхні теплообміну, без відкладень;
- втрати теплоти в навколишнє середовище відсутні;
- канали, утворені пластинами, мають однакові геометричні розміри і форму;
- рух теплоносіїв у каналах однаковий для всіх каналів ходу;
- втратою напору на подолання гідравлічного опору зневажаємо;
- тиск із боку пари, що конденсується, постійно.

При рішенні модельної задачі визначається потрібна поверхня теплообміну, при цьому шукана поверхня теплообмінника F представляється у вигляді суми:

$$F = F_k + F_{\Delta} \quad (7)$$

де F_k – поверхня, на якій відбувається конденсація пари;

F_{Δ} – поверхню, що забезпечує переохолодження конденсату.

Таким чином, задача зводиться до рішення двох задач по визначенню теплопередаючих поверхонь при конденсації пари і «водо – водяного» теплообмінника в зоні переохолодження конденсату.

Через особливості процесу конденсації пари визначення F_k вимагає розгляду процесів, що складають теплоперенос від пари, що конденсується, до води, що нагрівається.

За умови, що коефіцієнт тепловіддачі з боку води, що нагрівається, відомий, і що саме тут зосереджено більший з термічних опорів теплопередачі, з рівняння Ньютона-Рихмана:

$$F_k = \frac{Q_k}{\alpha_g (t_{cm} - t_g)} \quad (8)$$

де Q_k – тепловий потік, який необхідно відвести від пари, що конденсується;

α_g – коефіцієнт тепловіддачі;

t_{ct} – температура стінки;

t_b – температура води в точці повної конденсації пари; $t_g = \frac{1}{l} \int_0^{l_k} t dl$, де l_k – довжина пластин конденсації.

Остаточно необхідну поверхню F_k можна визначити у вигляді:

$$F_k = \frac{Q_k}{\alpha_g \left(\frac{(B+A) \sum R_i}{\alpha_g \sum R_i + 1} - t_g \right)} \quad (9)$$

де A і B – інтегральні коефіцієнти, які визначаються відповідно типу пластин, $A = \alpha_g \square t_g$,

$B = \frac{t_k}{\sum R_i}$, де t_k – температура конденсату; $\sum R_i = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{nl}}{\lambda_{nl}}$ – термічний опір, $\delta_n, \delta_k, \delta_{nl}$ –

товщини нерухомого відносно плівки конденсату тонкого парового підшару, плівки конденсату та пластини; λ – коефіцієнт теплопровідності.

Для визначення F_k по формулі (9) необхідно оцінити товщину плівки конденсату δ_κ і нерухомого відносно плівки конденсату тонкого парового підшару δ_n .

Розроблена методика розрахунку для області з малою швидкістю пари $G_n/v \leq 400$ дозволила уточнити розрахункову поверхню теплопередачі для конденсатора. Порівняння поверхонь, розрахованих з урахуванням зони низької швидкості пари і без її урахування показало, що в першому випадку розрахункова поверхня на 8...10 % нижче, ніж у другому.

На основі синтезу й аналізу наявних даних отримана модель теплопередачі пари на вертикальній гофрованій поверхні, яка представлена на рис. 2.

Було визначено товщину плівки конденсату в довільній крапці при ламінарному плинні:

$$\delta_x^n = \sqrt[4]{\frac{4\mu_{жс} \lambda_{жс} (T_\kappa - T_{cm})_x}{r \rho_{жс} g \cos(90^\circ - \gamma)}} \quad (10)$$

Для плинну плівки по навітряній (зворотній) похилої поверхні вираження (10) прийме вид:

$$\delta_x^n = \sqrt[4]{\frac{4\mu_{жс} \lambda_{жс} (T_\kappa - T_{cm})_x}{r \rho_{жс}^2 g \cos \gamma}} \quad (10^I)$$

Рівняння (10) і (10^I) дозволяють оцінити товщину плівки конденсату, а, також і коефіцієнти теплопередачі на різних боках гофр. Для оцінки конвективної тепловіддачі від пари до плівки конденсату в розглянутому елементі поверхні користувалися функцією розподілу локальних значень коефіцієнта тепловіддачі уздовж елемента поверхні, використовуючи дані експериментальних досліджень. З урахуванням визначених у вигляді (10) і (10^I) товщин плівки конденсату і модельного розподілу коефіцієнта тепловіддачі $\alpha^* = \left(\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \right)_{\text{под}} = 0,75\xi + 0,3$ схема розрахункової моделі може бути представлена у вигляді, зображеному на рис. 3.

Коефіцієнт теплопередачі елемента поверхні в цьому випадку визначається як:

$$k_x(\xi) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^*(\xi)} + \frac{\delta_x(\xi)}{\lambda_{жс}} + \frac{\delta_{nl}}{\lambda_{nl}} + \frac{1}{\alpha_{охл.в.}(\xi)}} \quad (11)$$

Визначений у такому вигляді коефіцієнт теплопередачі використовується в позонній методиці розрахунку пластинчастих парових теплообмінників.

У **третьому розділі** надано результати експериментальних досліджень тепло-гідрравлічних характеристик пластинчастих теплообмінних апаратів.

Для рішення задачі експериментального дослідження теплопередачі і параметрів пластин на кафедрі загальної хімічної технології, процесів і апаратів НТУ «ХП» була створена експериментальна установка для гідрравлічних і теплових іспитів ПТА, схему якої подано на рис.4.

Методика проведення експерименту передбачувала визначення наступних параметрів:

- витрата теплоносія, що нагрівається, (холодна вода G_x);
- температури теплоносія, що нагрівається, на вході $t''_{хол}$ і виході $t'_{хол}$ з ПТА;
- температури теплоносія, що гріє, на вході $t'_{гор}$ і виході $t''_{гор}$ з ПТА.

Для визначення середнього значення коефіцієнту тепловіддачі по рівнянню Ньютона задавалися температурою пластини, яку визначали у вигляді:

$$t_{пл} = \frac{1}{2} \left(\frac{t'_{гор} - t''_{гор}}{2} + \frac{t''_x - t'_x}{2} \right) \quad (12)$$

Така методика визначення температури пластини введена для узгодження цього параметра з позонною методикою розрахунку ПТА, що дозволило застосувати отримані надалі дані для розрахунку конденсаторів без додаткового аналізу такої можливості через єдиний підхід у розрахунку визначальної температури в методі розрахунку й експериментальному дослідженні.

Проведено оцінку погрішності вимірів при проведенні експериментальних досліджень. При розрахунку коефіцієнта тепловіддачі розбіжність не перевищує 5 %. Експериментальні дослідження тепловіддачі води в теплообміннику «Альфа-Лаваль» із пластинами з синусоїдальним профілем гофр і площею теплопередаючій поверхні 0,5 м² показали, що в діапазоні числа $Re=1800\dots3000$ одержуваний коефіцієнт тепловіддачі добре погодиться з даними, що рекомендуються «Альфа-Лаваль» при виборі ПТА.

На підставі отриманих результатів експериментальних досліджень отримано критеріальне рівняння тепловіддачі, що містить конструктивний параметр пластини T/H – відношення половини кроку гофр до їхньої висоти:

$$\overline{Nu} = 0,532 Re^{0,623} Pr^{0,43} (T/H)^{-1,04} \quad (13)$$

Це рівняння отримане для значень числа $Re=1300\dots3000$, і діапазону геометричного параметра гофр $T/H=2,0\dots3,5$.

Рівняння (13) дозволяє виявити найбільш раціональний діапазон геометричного параметра (Т/Н) для обґрунтованого вибору гофрованої поверхні пластин. Висота гофри безпосередньо не впливає на інтенсивність тепловіддачі при конденсації пари і з боку води, однак від цього розміру залежить площа гофрованої поверхні. Чим менше Н, тим ближче така поверхня до гладкої пластини і, отже, нижче її гідравлічний опір, потрібна менша мінімальна товщина листа при штампуванні пластин. Таким чином, критеріальне рівняння (13) дозволяє оцінити тепловіддачу від пластини до потоку охолоджуючої води, де зосереджене найбільше з термічних опорів тепловіддачі. Це вираження дозволяє проводити варіантні конструкторські пророблення з урахуванням геометричного параметра (Т/Н), визначати тип пластини і компактність апарата в цілому.

У **четвертому розділі** наведено результати вибору конденсаторів для промислових теплових мереж і підігрівника сольового розчину CaCl_2 для виробництва рідкого хлористого кальцію на підставі отриманих наукових результатів. Також наведено удосконалену методику оцінки надійності систем теплопостачання на основі поняття функціональної надійності теплообмінника.

Проведено вибір пластинчастого теплообмінного апарата, призначеного для утилізації низькопотенційної вторинної пари (до $60\text{ }^\circ\text{C}$) вакуум-випарного апарата для попереднього підігріву сольового розчину, що містить до 15 % розчину CaCl_2 . Схему виробництва рідкого хлористого кальцію наведено у додатках. Аналіз отриманих результатів показав, що утилізація низькотемпературної пари має специфічні особливості, тому що робота теплообмінного апарата з боку сольового розчину відбувається при малих швидкостях руху теплоносія в каналах, що, у кінцевому рахунку, пояснює невисоке значення коефіцієнта теплопередачі. Низькі значення швидкостей у каналах сприяють утворенню відкладень на пластинах (інкрустації). Однак для заданих технічних умов практична реалізація теплообмінного апарата іншого типу (не пластинчастого) проблематична.

Отримані результати було використано для розрахунку парових пластинчастих теплообмінників для утилізації залишку тепла хімікотехнологічних процесів для реконструкції систем опалення і ГВП. Вибір ПТА було здійснено на основі удосконаленої методики, реалізованої у вигляді пакета прикладних програм. АТ «Співдружність-Т» із застосуванням результатів цього дослідження була зроблена реконструкція систем опалення двох хлібозаводів у м. Вінниці і двох у м. Черкаси. У результаті реконструкції системи опалення хлібозаводу №2 у м.Вінниця, економія газу за опалювальний період склала 11 %, з них у наслідок переходу системи опалення з парової на водяну – 6–7 % у порівнянні з аналогічним періодом року до реконструкції. Зважаючи на те, що в розглянутому випадку витрата пари на технологічні нестатки дорівнює витраті на опалення в самий холодний період, економія власне в системі опалення за рахунок упровадження теплового модуля склала 14–17 %. Проведене обстеження ряду підприємств

харчової і переробної промисловості показало, що пара, використовувана на технологічні нестатки, цілком не конденсується, а тільки втрачає температуру і тиск практично до рівня атмосферного і потім повертається в конденсатний бак. При цьому губиться значна кількість тепла і на опалення йде пряма пара з котельні. Це відбувається в силу того, що кожухотрубчаті бойлера не в змозі забезпечити необхідні параметри теплоносія при низькому тиску пари. При установці модуля на базі пластинчастих теплообмінників з'являється можливість використання тепла зворотної пари для опалення, що спричиняє значну економію газу в опалювальний період.

Розглянуто економічну доцільність застосування енергозберігаючих заходів з урахуванням ступеня експлуатаційної надійності, визначений найбільше економічно доцільний режим обслуговування і роботи устаткування. Для визначення надійності ПТА використовується методика, що враховує утворення забруднень на теплопередаючій поверхні. Під надійністю розуміється збереження експлуатаційних якостей системи або її елементів у часі. На основі наявних даних був зроблений висновок, що коефіцієнт теплопередачі не повинний відрізнитися від розрахункового значення більш ніж на 7 %. З урахуванням цього під безвідмовною роботою теплообмінника розуміємо такий стан його теплопередаючій поверхні, коли термічний опір забруднень не перевищує максимально припустимого значення. З урахуванням цього визначення і наявних даних була визначена імовірність безвідмовної роботи у виді:

$$P(t) = e^{-6,25 \cdot 10^{-4} \cdot t} \quad (14)$$

З урахуванням прийнятого визначення відмовлення було встановлено, що утворення шару відкладень з термічним опором R_{\max} стає достовірною подією через 600 годин роботи пластинчастого теплообмінного апарата, або 9,5 тижнів. У відповідність з цим рекомендовано і відповідний графік обслуговування пластинчастих теплообмінних апаратів, з урахуванням наявності резервного теплообмінника.

На рис. 5 представлений фрагмент графіка роботи теплового пункту з двома ПТА з резервуванням, однак, в основу складання графіка може бути покладений принцип однакового напрацювання (зносу) кожним з теплообмінників, і тоді в якості резервного будуть виступати послідовно 3-й, 2-й і 1-й теплообмінники відповідно.

Для обслуговування, розбирання і зборки пластинчастого теплообмінного апарата необхідно 3-и доби (72 години). З іншого боку, у відповідність з наявними даними в період від 300 годин роботи до 600 годин, термічний опір відкладень подвоюється, тому в цей інтервал часу роботи ПТА і необхідно провести обслуговування. Фрагмент такого графіка представлений на рис. 6.

З погляду експлуатації послідовне виведення в резерв теплообмінників уявляється більш кращим, оскільки дає можливість проводити послідовне обслуговування теплообмінників не в

настільки короткий термін і, крім того, уникнути частого перерегулювання і переналагодження при кожному новому введенні в роботу теплообмінників. Порівняння звичайного графіка експлуатації й експлуатації з перемінним обслуговуванням і включенням показало, що для звичайного графіка експлуатації імовірність безвідмовної роботи теплообмінних апаратів постійно падає з часом, у той час як при перемінному обслуговуванні і включенні теплообмінних апаратів цей показник є високим і не опускається нижче значення 0,85.

У додатках наведені первинні дані експериментальних досліджень тепло-гідравлічних характеристик ПТА, фотознімки обстеження стану забруднень теплообмінної поверхні ПТА та колектора.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішення науково-практичної задачі підвищення теплових та експлуатаційних характеристик пластинчастих конденсаторів, що дає змогу удосконалити теплотехнологічні процеси підприємств хімічної промисловості.

У результаті проведеного дослідження отримані наступні наукові результати і практичні рекомендації:

1. На основі результатів теоретичного й експериментального досліджень розвинутий підхід до розрахунку пластинчастих конденсаторів, що відрізняється запропонованою методикою позонного розрахунку поверхні теплообміну, що включає зону повільного руху пари, величина якої складає області повної конденсації пари;
2. Одержала подальший розвиток теорія конденсації пари на вертикальній гофрованій поверхні при ламінарному режимі руху. враховуючої особливості плинину пари й істотно нерівномірну тепловіддачу уздовж гофри;
3. Отримані вираження для середньої товщини плівки конденсату на «навітряної» і «підвітряної» сторонах гофри вертикальної пластини, в якій зосереджено основний термічний опір процесу теплопередачі;
4. Отримане критеріальне рівняння тепловіддачі для пластин із синусоїдальним профілем гофр, що включає геометричний параметр, який дозволяє проводити варіантні конструкторські пророблення в діапазоні чисел Рейнольда $Re=1300...3000$ і діапазоні геометричного параметра гофр $T/H=2,0...3,5$;
5. Встановлено, що зона з низькою швидкістю пари $G_n/v \leq 400$ складає 10...12% довжини пластини, на якій здійснюється повна конденсація пари;

6. Одержала подальший розвиток теорія надійності стосовно до пластинчастих теплообмінників, застосування якої забезпечує задані імовірність безвідмовної роботи теплообмінного апарата (не нижче 0,85) і енерго-ефективність використання теплоти пари;
7. Виявлені методичні аспекти експлуатації ПТА з резервуванням; розроблені графіки обслуговування теплообмінників, що забезпечують задану надійність роботи і рівномірність зносу – утворення шару відкладень;
8. На основі аналізу даних різних авторів та результатів власних досліджень встановлено, що вплив теплофізичних характеристик теплоносія на процес конденсації і конкретно критерію Прандтля вимагають додаткових досліджень;
9. Розроблені теоретичні методи розрахунку пластинчастих теплообмінників-конденсаторів прийняті до впровадження і дають результати розрахунку поверхні теплообміну на 8...10 % нижче, ніж застосовувані дотепер, що забезпечує зниження витрат при застосуванні пластинчатих парових теплообмінників;
10. Упровадження розроблених графіків експлуатації теплообмінників забезпечує енерго-ефективне використання теплоти пари протягом усього часу роботи ПТА.

Експериментальна установка і методика іспитів ПТА втілені у навчальний процес на кафедрі загальної хімічної технології, процесів і апаратів НТУ „ХПІ” при проведенні лабораторних робіт при курсовому проектуванні за курсом «Основні процеси й апарати хімічної технології» для студентів хіміко-технологічних спеціальностей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Арсеньєва О.П. Модель теплопередачі при конденсації пара в пластинчатом теплообменнике // „Інтегровані технології та енергозбереження”. – Харків: НТУ”ХПІ”. – 2003. – №2. – С. 58-62

2. Анипко О.Б., Арсеньєва О.П. Надежность пластинчатых теплообменных аппаратов систем отопления и горячего водоснабжения с учетом образования загрязнений на теплопередающей поверхности // „Інтегровані технології та енергозбереження”. – Харків: НТУ”ХПІ”. – 2003. – №4. – С. 9-13.

Здобувач розробив підхід до оцінки надійності пластинчастих теплообмінних апаратів, застосування якого забезпечує задану ймовірність безвідмовної роботи пластинчастого теплообмінного апарату, запропонував графіки експлуатації ПТА з резервуванням.

3. Арсеньєва О.П. Экспериментальная установка для тепловых и гидравлических испытаний пластинчатых теплообменных аппаратов // «Труды Одесской национальной академии пищевых технологий». – Одесса: ОНАПТ. – 2003. – № 25. – С. 30-34

4. Товажнянский Л.Л., Бабак Т.Г., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Применение оптимальной компоновки пластинчатых теплообменников в системах теплоснабжения // „Інтегровані технології та енергозбереження”. – Харків: НТУ”ХПІ”. – 2001. – №4. – С. 3-7.

Здобувач розвинув підхід щодо методики розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів, яка дозволяє брати до уваги швидкість руху пари на теплопередаючій поверхні ПТА, розробив математичне забезпечення, яке було реалізоване у виді прикладних програм для вибору ПТА в умовах конденсаційних процесів.

5. Хавин Г.Л., Анипко О.Б., Демирский С.В., Арсеньева О.П. Паровые пластинчатые теплообменники для реконструкции систем отопления и горячего водоснабжения // „Коммунальное хозяйство городов”, научно-технический сборник. – Киев „Техніка”. – 2003. – № 49. – С. 34-38.

Здобувач отримав критеріальне рівняння тепловіддачі для пластин із синусоїдальним профілем гофри, що включає геометричний параметр, що дозволяє проводити варіантні конструкторські пророблення, розробив математичне забезпечення для розрахунку парових пластинчатих теплообмінників, за допомогою якого на Хлібозаводі № 2, м. Вінниця була зроблена модернізація системи опалення і ГВП.

6. Товажнянский Л.Л., Бабак Т.Г., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Применение пластинчатых теплообменников оптимальной компоновки в системах теплоснабжения // „Інтегровані технології та енергозбереження”. – Харків: НТУ”ХПІ”. – 2003. – №3. – С. 66-74.

Здобувач розробив позонну методику розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів та математичне забезпечення, яке було реалізоване у виді прикладних програм для вибору ПТА у системах тепло забезпечення.

7. Tovazhnyansky L.L., Babak T.G., Havin G.L., Arsenyeva O.P. The using of Plate Heat Exchangers with Optimal Grouping for District Heating Systems. // 15th International Conference CHISA 2002. – Prague. – 2002.– Т.2. – С. 94-102.

Здобувач розробив рекомендації щодо реконструкції теплових пунктів та вибору теплообмінних апаратів.

8. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arsenyeva O.P. Computer Design of Steam Plate Heat Exchangers // IChiaP’2003. – Pisa. – 2003.– Т.1. – С. 70-76.

На основі розробленої позонної методики вибору ПТА здобувач запропонував три теплообмінних апарати для підігріву рідкого соку перед випарюванням для технологічного процесу виробництва цукру.

9. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arsenyeva O.P. Computer Design and Application of Plate Heat Condensers for Retrofitting of Food Production Enterprises // 53^d Canadian Chemical Engineering Conference CSCh’2003. – PRES. – 2003. – С. 115-121.

Здобувачем запропоновано використання низкопотенційної вторинної пари на підприємствах харчової промисловості та проведено вибір теплообмінних апаратів, які використовуються у технологічному процесі виробництва цукру, та для хлібзаводу, де вторинна пара використовується для потреб опалення.

10. Пластинчатые теплообменники в промышленности: Учеб. пособие / Под общ. ред. Л.Л. Товажнянского – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – 232 с.

Здобувачем надано основи вибору пластинчастих теплообмінників, одним із теплоносіїв в яких є водяний пар. Надано методику розрахунку парових нагрівачів та конденсаторів на базі ПТА.

АНОТАЦІЇ

Арсеньєва О.П. Парові пластинчасті теплообмінники для удосконалення теплотехнологічних процесів промислових підприємств – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси й обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2004.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню процесу конденсації пари на гофрованій поверхні пластин пластинчастого теплообмінного апарату й експлуатаційних характеристик для вибору ПТА, які використовуються у технологічних процесах підприємств хімічної промисловості. Запропоновано позонну методику розрахунку парових пластинчастих теплообмінників, що дозволяє враховувати швидкість пари в теплообмінному апараті. Отримане критеріальне рівняння тепловіддачі для пластин із синусоїдальним профілем гофри, що включає геометричний параметр, який дозволяє проводити варіантні конструкторські розробки. Одержала подальший розвиток теорія конденсації пари на вертикальній гофрованій поверхні при ламінарному режимі руху.

На основі проведених досліджень впроваджено підігрівник сольового розчину CaCl_2 для виробництва рідкого хлористого кальцію та теплообмінні апарати для утилізації залишку тепла хіміко-технологічних процесів. Запропоновано удосконалену методику оцінки надійності систем теплопостачання на основі функціональної надійності теплообмінника, застосування якого забезпечує задану імовірність безвідмовної роботи пластинчастого теплообмінного апарату.

Ключові слова: теплові та масообміні процеси, теплообмін при фазових перетвореннях, розрахунок теплообмінного обладнання, теплообмінний апарат, конденсатор.

Арсеньєва О.П. Паровые пластинчатые конденсаторы для усовершенствования теплотехнологических процессов промышленных предприятий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химической технологии. – Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2004.

Конденсаторы относятся к широко используемому типу теплообменников с уникальными характеристиками. При разработке и создании конденсаторов для различных отраслей промышленности, в том числе и химической, возникает ряд научных и технических задач, связанных с теплообменом и движением жидкости при конденсации пара. Наиболее существенную роль играет скорость движения пара. Это приводит к различию интенсивности теплообмена пара при различных скоростях. Фактически внутри каналов при конденсации меняется средняя скорость пара по длине, что и обуславливает различные режимы течения пара и конденсата. Кроме того, при больших разностях температур в пленке ее физические свойства по сечению неодинаковы, что еще более усложняет задачу определения термического сопротивления пленки. На основе известных методов описания теплообмена при пленочной конденсации, которые дополнены методикой расчета конденсации медленно движущегося пара, разработана позонная модель конденсации, которая может быть применена к конденсаторам не только пластинчатого типа. В зависимости от скорости пара данная методика рассматривает две модели: дисперсно-кольцевую (для быстро движущегося пара при $Re_p > 4000$) и кольцевую (для медленно движущегося пара при $Re_p \leq 4000$).

Разработана модель теплопередачи при конденсации пара на вертикальной гофрированной поверхности и получены соотношения для средней толщины пленки конденсата на «наветренной» и «подветренной» гранях гофр пластины при ламинарном течении.

Процесс переноса теплоты в пластинчатых теплообменных аппаратах относится к сложным. В конструкциях ПТА применяются сложные формы теплопередающих поверхностей и образуемых ими каналов, в которых поток теплоносителя подвергается искусственной турбулизации за счет криволинейной формы каналов и отрыва потока при обтекании вершин гофр пластин. Применение рационального сочетания формы и размеров каналов для различных сред при рациональной компоновке позволяют достичь интенсивности теплоотдачи в 2..3 раза большей, чем в трубчатых теплообменниках при тех же значениях числа Re . В ПТА режим развитой турбулентности наблюдается уже при $Re=50..200$, что обеспечивается геометрической формой теплопередающей поверхности пластин. Для решения задачи экспериментального исследования теплопередачи и параметров пластин на кафедре общей химической технологии, процессов и аппаратов НТУ «ХПИ» была создана экспериментальная установка для гидравлических и тепловых испытаний ПТА. Разработана методика обработки экспериментальных данных, в которой определяющая температура пластины рассчитывается аналогично с предложенной во втором разделе позонной методикой расчета конденсаторов. Выбор рациональной поверхности пластинчатого конденсатора

должен отвечать требованиям максимально возможной теплоотдачи со стороны охлаждающей воды при минимальных затратах на ее прокачивание, низкой стоимости поверхности, при минимальной массе и габаритных размерах ПТА в целом. Впервые для данного типа пластин получено критериальное уравнение теплоотдачи, включающее геометрический параметр (Т/Н), что позволяет проводить варианты конструкторские проработки при выборе теплообменника с учетом геометрического параметра, определяющего тип пластины и компактность аппарата в целом.

Разработанный усовершенствованный метод расчета паровых пластинчатых теплообменных аппаратов был применен в химической технологии для подогревателя соляного раствора CaCl_2 для производства жидкого хлористого кальция путем утилизации теплоты низкопотенциального вторичного пара. На основе результатов теоретического и экспериментального исследований усовершенствована методика расчета конденсаторов для промышленных тепловых сетей при энергоэффективной реконструкции тепловых пунктов.

Эксплуатирующиеся паровые теплообменные аппараты с течением времени потребляют больше греющего теплоносителя, что снижает эффективность их использования и увеличивает сроки окупаемости. Развита методика оценки надежности систем теплоснабжения на основе введенного понятия функциональной надежности теплообменника. На основе проведенных исследований предложены графики эксплуатации пластинчатых теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: тепловые и массообменные процессы, теплообмен при фазовых превращениях, расчет теплообменного оборудования, теплообменный аппарат, конденсатор.

Arsenyeva O.P. Steam Plate Heat Exchangers for Improvement in Heat Processes of Industrial Enterprises. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of engineering science in specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical engineering. – National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”, Kharkov, 2004.

The work is dedicated to investigation of steam condensation process on the plate's corrugated surface of Plate Heat Exchanger and operating characteristics for selecting of Heat Exchangers, which are used in chemical industry. The zonal technique for calculation of Steam Plate Heat Exchangers is proposed, which allow to take into account the steam speed in the Heat Exchanger. The criteria equation of heat transfer is obtained for the plates with sinusoidal corrugation, which includes the geometrical parameter, what allow to carry out the variant design developments. The theory of steam condensation on the vertical corrugated plate at the condition of laminar flow was further developed.

At the basis of investigations carried out, the heater of salt solution CaCl_2 for production of liquid calcium chloride and Heat Exchangers for utilization of secondary heat in chemical engineering processes

for retrofitting of heating and Hot Tap Water systems were introduced. The developed technique of safety estimation of heat supply systems was proposed at the basis of functional safety of Heat Exchanger, which application provides the predetermined probability of no-failure operation of Plate Heat Exchanger.

Key words: heat and mass transfer processes, heat transfer at phase changes, calculation of heat exchange equipment, heat exchanger, condenser.