

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Данилов Юрій Борисович

УДК 66.045.004.14: 62-72

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО
ТЕПЛООБМІННОГО І ВИПАРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Харків – 2009

Дисертація є рукопис.

Роботу виконано в Українському науково-дослідному і конструкторському інституті хімічного машинобудування (м. Харків) та на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти та науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
ТОВАЖНЯНСЬКИЙ ЛЕОНІД ЛЕОНІДОВИЧ,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут", ректор

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
СЕМЕНИШИН ЄВГЕН МИХАЙЛОВИЧ,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри хімічної інженерії

доктор технічних наук, професор
СКЛАБІНСЬКИЙ ВСЕВОЛОД ІВАНОВИЧ,
Сумський державний університет, завідувач кафедри
процесів та обладнання хімічних та нафтопереробних
виробництв

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
ТРОШЕНЬКІН БОРИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ,
"Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного" НАНУ, провідний науковий
співробітник

Захист відбудеться " 23 " квітня 2009 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 20 березня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Тимченко В.К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Процеси теплообміну та випарювання широко використовуються в більшості технологічних процесів промислових виробництв хімічної та нафтогазо-переробної галузей. Від ефективності функціонування нагрівників, холодильників, випарників, конденсаторів, дефлегматорів та інших видів теплохімічної апаратури, їх економічності та надійності значно залежить ефективність виробництв та галузі в цілому, що багато в чому визначають енергоемність продукції. На сьогодні цей показник складає 0,89 кг умовного палива на 1 дол. США, що приблизно в $2,5 \div 3$ рази перевищує середній світовий рівень і не забезпечує конкурентоспроможності продукції, яку виробляють підприємства України.

Це пояснюється застосуванням в експлуатації застарілого технологічного устаткування хімічного та нафтогазового виробництв, які системно не оновлюється в післякризовий період, та відсутністю цілеспрямованої побудови та реалізації сучасних концепцій інтенсифікації та оптимізації процесів теплообміну, які забезпечують зниження матеріаломісткості устаткування, енергозбереження в умовах експлуатації, використання низькопотенційного тепла як вторинного енергетичного ресурсу, забезпечення необхідних екологічних умов.

Враховуючи значну вагомість хімічного та нафтогазопереробного комплексу України в економіці країни, значні об'єми споживання та перероблення енергоносіїв, а також великі потоки перетвореної у виробництвах теплової енергії, – створення науково-практичних основ енергозбереження з використанням новітніх досягнень в сфері теплообміну, а також проектування та промислової реалізації теплохімічного устаткування є актуальною науковою проблемою, рішення якої присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт відповідно Постановам КМ України, програмам: НАН України, Міністерства промислової політики України. Здобувач був науковим керівником хоздоговорних та держбюджетних тем: "Дослідження гідродинамики і теплообміну випарювального апарата з багаторазовим використанням тепла" (№ ДР 01880044377); "Дослідження умов випарювання та можливостей інтенсифікації і оптимізації процесів в випарниках плівчатого типу та з використанням накатних труб" (№ ДР 01890006686); "Розробка типорозмірного ряду пластинчастих теплообмінників з розборним корпусом на тиск 3,2 МПа" (№ ДР 0108U008369) - за державною програмою Міністерства промислової політики України з розвитку машинобудування; "Розроблення технічних проектів устаткування секції гідроочистки бензинів, дизельного пального, ізомерізації, амінової очистки комбінованої установки газів" Паливний комплекс ВАТ "НПК "Галичина" (№ ДР 0108U006802, Постанова ДКНТ України № 12 від 04.05.92 р. "Ресурсозбереження. Проблеми нафтогазових ресурсів України та наукові основи їх рішень"); "Розроблення нормативних документів (устаткування для хімічної промисловості)" (№ ДР 0104U005628, розпорядження Кабінету Міністрів України від 04.03.2004 р. № 123-р "Про затвердження плану робіт з розроблення національних стандартів, гармонізованих з міжнародними та європейськими стандартами, у сфері підтвердження відповідності (сертифікації) промислової продукції на 2004÷2011 роки"); "Дослідження напрямку модернізації

випарних апаратів з природньої циркуляції, тип 1.2, примусової циркуляції, тип 2.1 та східної плівки. Тип 3.1 з приміненням ФСА” (№ ДР 01860013268, ВАТ “УкрНДІ-хіммаш”); “Дослідження технології та розробка випарної установки зануреного горіння для концентрування дистилерної рідини виробництва гранульованного хлориду кальцію потужністю 30 тис.тон/рік” (№ ДР 0104U005628, ЗАТ “Хімгортехнологія” м. Санкт-Петербург); “Створення випарювальних апаратів плівчатого типу, які забезпечують максимальне використання тепла процесу випарювання” (№ ДР 0100056263, ВАТ “УкрНДІхіммаш”); “Корозійні дослідження сплавів, які випускає фірма “Крупп ВДМ”, в умовах виробництва діоксиду титану” (№ ДР 0101U001893, фірма “Крупп ВДМ”, Німеччина). Здобувач був відповідальним виконавцем сумісної роботи з Інститутом електрозварювання ім. Є.О.Патона від ВАТ “УкрНДІхіммаш” “Розробка технології ремонту колон та ємкостей зі двохшарових сталей СтЗсп(16ГС, 09Г2С) +08Х13 установки АВТ масляного виробництва № 3 ЗАО “УкрТатнафта” та технологічне супроводження ремонтних робіт” (№ ДР 0105U004690, Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”).

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення науково-практичних основ створення енергозберігаючого теплообмінного та випарювального обладнання хімічних виробництв, що будуть забезпечувати високі споживчі якості виробів техніки та виробництв, зниження витрат матеріальних, енергетичних та трудових ресурсів в сферах виготовлення та експлуатації, при забезпеченні вимог щодо захисту здоров'я людей та довкілля.

Для досягнення мети, поставленій у роботі, вирішуються наступні задачі:

- проведення аналізу сучасного науково-технічного рівня теплообмінного та випарювального устаткування, розробка класифікації та визначення перспективних напрямків наукового дослідження щодо створення високоефективного енергозберігаючого устаткування та його подальшого освоєння;

- здійснення комплексних досліджень теплових та гідромеханічних процесів в пластинчастих теплообмінниках в тісному зв'язку з їх герметичністю та корозійною стійкістю;

- розвинути теоретичні основи опису математичних моделей течій рідини, теплообміну та гідроопору у міжпластинному просторі сітчасто-поточних теплообмінників;

- здійснити комплексні дослідження процесів теплообміну і випарювання у випарниках з трубчатою поверхнею теплообміну та з листа - на коаксіальних вертикально розташованих конічних формах та плоских вертикальних поверхнях з розробкою математичних моделей;

- розробити науково обгрунтовані інженерні методи розрахунків теплообмінних апаратів з політетрафторетилену(фторопласту);

- розробити науково обгрунтовані інженерні методи розрахунків випарників зануреного горіння з роздільним виведення димових газів та вторинної пари;

- розробити рекомендації для промислового виробництва конкурентоспроможних сучасних теплообмінних та випарювальних апаратів та установок для підприємств хімічної, нафтогазохімічної та суміжних галузей промисловості.

Об'єкт дослідження – процес теплообміну та випарювання в технології хімічних та нафтогазових виробництв.

Предмет дослідження:

- закономірності тепловіддачі та гідроопору в теплообмінних та випарювальних апаратах промислового призначення при передачі тепла через непроникну стінку з рухом теплоносіїв в каналах зручнообтікаючих форм;
- закономірності тепловіддачі в гравітаційних плівчастих випарниках з багатозразовим використанням тепла;
- теплофізичні процеси в апаратах зануреного горіння з роздільним виведенням потоків пари та димових газів;
- закономірності тепловіддачі та гідроопору в теплообмінних апаратах з політетрафторетилену(фторопласту).

Методи дослідження. Всі теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії гідродинамики та теплообміну. Для побудови фізичних та математичних моделей структур потоків та руху теплоносіїв в міжпластинній порожнині сітчасто-поточного теплообмінника використовується метод накладення потоків з теорії потенційних течій - вихрового підкручення – за теорією Стокса-Гельмгольца та з урахуванням індукованої швидкості відповідно до аналітичних залежностей Біо-Савара. При отриманні виразів довжини шляху випарювання плівки розчину та коефіцієнту тепловіддачі використані статистичні методи обробки даних чисельних експериментів. Експериментальні лабораторні та стендові дослідження фізичних моделей, що проведено за допомогою сучасних високоточних вимірювальних приладів. Випробування з використанням реальних середовищ, що здійснено на дослідно-промислових зразках та штатному устаткуванні на регламентованих виробничих режимах, дозволило оцінити адекватність розроблених математичних моделей та зіставити отримані результати з даними інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів. На базі виконаних теоретичних та експериментальних робіт отримані такі наукові результати:

- вперше сформовано системний підхід до рішень та постановки пріоритетних наукових та технічних завдань створення парку енергозберігаючого теплообмінного та випарювального обладнання в хімічному виробництві з урахуванням органічного зв'язку нової техніки і передових технологій та конкурентоздатності;
- набула подальшого розвитку концептуальна спільність отриманих теоретичних та інженерних рішень гідродинамики та теплообміну для сітчасто-поточних теплообмінників з розрахунками та конструюванням трубчастих, ламельних, стрічково-поточних пластинчастих, щілинних (з гладкими гріючими поверхнями), таких, що є окремими випадками отриманого загального рішення;
- вперше побудована ідентифікована осередкова структура міжпластинного простору сітчасто-поточного теплообмінника; встановлено, що вимушений перебіг рідини в міжпластинному сітчасто-поточному просторі здійснюється у формі ряду поздовжніх двозахідних конгруентних гвинтових потоків зі взаємним підкрученням течій за різноспрямованими проточними частинами осередків та зроблено математичний опис течій з використанням теорії плоских потенційних та вихрових течій;
- використання методу накладення потенційних потоків (поступального плоско-паралельного, джерела та стоку) дозволило отримати теоретичне рішення рів-

няння Лапласа, яке визначає потенціал швидкостей, функцію струму, значення вектора швидкості та його напрям в будь-якій точці швидкісного поля проточної частини осередку, що, у свою чергу, при рішенні зворотної задачі дає можливість сформулювати поле швидкостей для будь якої форми осередку;

- розроблена методика рішення задач течій, що обтікають складні форми поверхонь теплообміну (на основі математичного апарату функцій комплексного змінного);

- отримано функції впливу взаємного підкручення течій в осередку на швидкість рідини у стінки, яка враховується залежністю Стокса-Гельмгольца, а індукованої швидкості - залежністю Біо-Савара;

- розроблена математична модель тепловіддачі при нагріві та випарюванні у випарювальних апаратах багаторазового використання пари, в єдиному агрегаті, в яких розчин тече у вигляді гравітаційної плівки на коаксіально розташованих конічних та вертикальних плоских поверхнях теплообміну;

- отримано вирази для обчислення теплообміну та втрат рушійного тиску в теплообмінних апаратах з політетрафторетилену (фторопласту), його сополімерів та поліолефінів;

- отримано й досліджено теоретичні рішення для конструювання трубчастих випарних апаратів з гріючими камерами, що мають тонкостінні трубні решітки, сумірні (за товщиною) зі стінками труб, що знижує металоємність гріючих камер від 20 до 50 %;

- сформульовано й досліджено теоретичні рішення та конструкції енергозберігаючих випарних установок зануреного горіння - парогенераторів - з роздільним виведенням димових газів та сокової пари;

- отримано експериментальні дані для розрахунків та конструювання енергозберігаючих видів пластинчастих теплообмінних апаратів (з прямолінійними та S-подібними гофрами);

- запропоновані науково обгрунтовані рекомендації щодо вибору нових видів корозійностійких сталей, сплавів та засобів зварювання, які побудовані за потребами високих технологій, що забезпечують значне зниження промислових експлуатаційних та ремонтних енерговитрат.

Практичне значення одержаних результатів. Для хімічної промисловості вирішено проблему розробки методів гідродинамічних, теплових і міцносних розрахунків та промислового створення енергозберігаючих теплообмінних та випарювальних апаратів поверхневого та контактного типів зниженої металоємності, які зменшують енерговитрати для цільового передавання тепла. Створено: методи розрахунку і конструювання національних та галузевих нормативно-технічних матеріалів, їх гармонізація з європейськими стандартами, нові конструкції промислових теплообмінних та випарювальних апаратів. Проведено уніфікацію та стандартизацію з оптимальним вибором устаткування на задані умови експлуатації. Організовано нові спеціалізовані промислові виробництва теплохімічного устаткування галузевого застосування, зокрема:

- пластинчастих теплообмінників та теплообмінних апаратів із фторопластів та поліолефінів на ВАТ «Завод «Павлоградхіммаш»;

- випарювальних установок заглибного горіння у ВАТ «УкрНДІхіммаш», та на ВАТ «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе»;
- роторних випарників у ВАТ «УкрНДІхіммаш»;
- випарних апаратів та випарювальних установок зі штучними турбулізаторами на ВАТ «Сніжнянськхіммаш».

Новизна, обґрунтування технічних рішень, що до конструкції теплообмінного та випарного обладнання підтверджена 23 авторськими свідоцтвами та патентами України.

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї та положення дисертації розроблено здобувачем особисто, зокрема об'єкт та предмети дослідження, теоретичні гіпотези та їх експериментальна перевірка. Конкретний внесок здобувача відбито в переліку наукових праць. З метою узагальнення та практичної реалізації отриманих наукових та інженерних рішень здобувачем проведено систематизацію та класифікацію теплообмінного та випарного устаткування нафтогазохімічного комплексу країни з подальшою розробкою державних стандартів України та їх кореляцією зі стандартами Євросоюзу.

Апробація результатів досліджень. Результати, викладені в дисертації, були розглянуті та обговорені на: Всесоюзній науково-технічній конференції «Основні напрями хлорної промисловості відповідно до потреб народного господарства» (м. Калуш, 1983 р.); Всесоюзній науковій конференції «Підвищення ефективності, вдосконалення процесів та апаратів хімічних виробництв» (м. Харків, 1985 р.); Російській національній конференції з теплообміну (м. Москва, 1994 р.); Міжнародній конференції «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів» (м. Львів, 2002 р., 2006 р., м. Северодонецьк, 2007 р.); Міжнародному семінарі «Сучасні технології зварювання та нові конструкційні матеріали в хімічному машинобудуванні та промисловості» (м. Київ, 2003 р.); Міжнародній конференції «Фізико-хімічні основи новітньої технології XXI століття» (м. Москва, 2005 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Хімія – XXI століття: нові технології, нові продукти» (м. Кемерово, Росія, 2006 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані технології та енергозбереження» (м. Алушта, 2006 р.); семінарі НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації споруд і машин» (м. Київ, 2006 р.); форумі «Хімічні підприємства України – 2007 «Проблеми інвестицій та інновацій в Україні» (м. Київ, 2007 р.).

Щорічно результати сворення та випуску теплохімічного енергозберігаючого обладнання підприємствами Мінпромполітики України здобувач докладав на науково-технічних нарадах міністерства та радах об'єднань підприємств (1996 ÷ 2009 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено в 88 наукових працях, з них: 34 фахових виданнях ВАК України, 1 навчальний посібник, 23 авторських свідоцтвах та патентах. За результатами проведених розробок, за участю здобувача, створено 13 державних та галузевих стандартів.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, 9 додатків. Повний обсяг дисертації складає 438 сторінок, з них: 80 рисунків на 37 окремих сторінках; 107 рисунків за текстом; 197 літературних джерел на 23 сторінках; 3 таблиці на 2 окремих сторінках, 27 таблиць за текстом; додатки на 71 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність роботи, доведено її зв'язок із науковими програмами, визначено методи та завдання дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення роботи, дано інформацію стосовно її основних результатів, впровадження та публікацій.

У першому розділі наведено багаторічний світовий і вітчизняний досвід створення та практичне використання в хімічній та нафтогазохімічній галузях промисловості теплообмінних та випарювальних апаратів та установок. Аналіз літератури та показників ефективності теплообміну виявили: недостатньо інтенсивний і вельми енерговитратний теплообмін та високі питомі втрати рушійного натиску; недостатню для сучасних вимог надійність, зв'язану, головним чином, з проблемами міцності, герметичності, корозійної стійкості та забрудненням поверхонь, що передають тепло; високу металоміскість.

Враховуючи аналіз відмов та витратних експлуатаційних характеристик теплообмінного та випарювального устаткування, узагальнення претензій експлуатаційників, а також результати власних досліджень визначено вибір напрямків перспективних наукових розробок, а також поставлено висококонкурентні наукові та конструкторські завдання, реалізація яких у поєднанні з новими технологічними ідеями, на рівні винаходів, з'явилася основою для створення та організації виробництва енергозберігаючої продукції інтенсивної дії, що складає більше половини всього теплотехнічного устаткування галузі, що виробляють у країні.

Теоретичними основами створення вітчизняного теплообмінного та випарного устаткування для хімічних та нафтогазових виробництв є результати фундаментальних досліджень гідродинаміки та тепломасообміну П.Л. Капіци, Л. Д. Ландау, Є.М. Ліфшиця, П.Г. Романкова, Г. Шліхтінга, М.В. Кирпичова, Ю.М. Мацевітого, С.С. Кутателадзе, А.І. Леонтьєва, Б.С. Петухова, А.А. Жукауськаса, А.А. Долінського, Л.Л. Товажнянського, Н.І. Гельперіна, О.Б. Аніпко, А.А. Гухмана, Ю.И. Дитнерського, В.В. Кафарова, Н.М. Жаворонкова, Л.М. Коваленка, Л.П. Перцева, В.С. Фокіна, Л.М. Ульєва, А.Р. Ястребенецького, А.М. Кутєпова, Б.А. Трошенькіна, П.О. Капустенка, В.А. Молярєнко, В.А. Цибульника, В.А. Малюсова та ін. Розвиток ідей системного аналізу та принципів синтезу складних хіміко-технологічних систем, викладених в роботах В.В. Кафарова, А.І. Бояринова, А.Н. Дорохова, Г.М. Островського, В.П. Мешалкіна, В.Л. Петрова, Г.Є. Канєвця, Л.С. Гордєєва, І.О. Протод'якова дозволяє вирішувати багато завдань розрахунку, оптимізації, проектування та виробництва сучасних теплообмінних апаратів та систем. Роботи Д.А. Франк-Каменецького, М.Г. Слинька, В.С. Бєскова заклали основи теорії теплової стійкості найважливіших хімічних виробничих систем.

Результати досліджень конвективного теплообміну в сітчасто-поточних пластинчастих теплообмінниках, які отримані засновником наукової школи процесів тепло- та масообміну в каналах складної геометричної форми проф. Л.Л. Товажнянським, за методологією системної декомпозиції складної структури каналів на складові обтічні елементи, дозволили обгрунтувати та побудувати наукову програму, що задовольняє сучасній науковій та інженерній практиці.

На основі досягнутого визначені найбільш перспективні напрямки енергозбереження, завдання досліджень та шляхи їх промислової реалізації, з урахуванням сучасного стану економіки України.

Відомий арсенал теплообмінного устаткування для хімічних виробництв надзвичайно багатообразний як за функціональним призначенням, так і за особливостями виконання, що також стало однією із спонукальних причин створення науково-практичних основ енергозбереження в галузі. Традиційний опис кожного теплохімічного процесу та його різноманітне апаратне оформлення являють собою надзвичайно трудоміську справу. Проведений аналіз дозволив провести декілька обмежену класифікацію теплообмінної апаратури з непроникною стінкою (рис. 1) та дати оцінку теплової ефективності конструкцій та їх питомої металоємності.

Рис. 1 - Класифікація теплообмінних апаратів хімічних та нафтогазохімічних виробництв

Класифіковано три достатньо автономних (що розрізняються за виконаннями) напрямки створення конструкцій:

- використання металевих трубчастих гріючих поверхонь;
- використання формових неметалевих гріючих поверхонь;
- використання гріючих поверхонь з листового металу (та інших конструкційних матеріалів).

На рисунках 2 та 3 показано порівняння питомих витрат енергії та металу в різних конструкціях промислових теплообмінних апаратів (при конвективному теплообміні). Як модельна рідина вибрана вода (за середньою температурою потоку 50 °С).

Рис. 2 демонструє, що при конвективному перенесенні тепла найбільшу теплоенергетичну ефективність мають пластинчасті теплообмінні апарати сітчасто-потокowego типу.

Технічний рівень трубчастої металеві теплообмінної апаратури, що традиційно випускається, поступається рівню розглянутих нових конструкцій, і без корінного перегляду принципів проектування та розроблення більш точних теоретичних методів розрахунку деформацій, корозійної стійкості та міцності, їх конкурентоспроможність підвищена бути не може. Один з альтернативних шляхів рішення проблеми полягає в створенні конструкції, в якій гармонійніше поєднуються окремі її елементи, що сполучаються, зокрема знижується напружений стан трубної решітки та труб, а спеціальне рифлення поверхні нагрівальних труб, застосування спіральних труб, дозволяє підвищити і теплову ефективність.

- 1 - пластини фірми «Альфа - Лаваль»;
- 2 - пластини типу 0,5 М;
- 3 - пластини фірми «Розенблад»;
- 4 - пластини типу 0,3 та 0,5 Е;
- 5 - пластини фірми «Суперплейт» та «Хісака»;
- 6 - пластини з горизонтальними гофрами;
- 7 - пластини фірми APV;
- 8 - теплообмінник спіральний;
- 9 - теплообмінник кожухотрубчастий;
- 10 - теплообмінник пластинчасторебристий з прямими ребрами

Рис.2 - Коефіцієнти тепловіддачі деяких конструкцій теплообмінників при конвективному перенесенні тепла залежно від питомих витрат енергії на подолання гідроопору

- 1, 2, 3 - розбірні пластинчасті теплообмінники з пластинами типів:
I - 0,5Е; II - 0,3; III - 1, 3;
- 4 - зварний блочний пластинчастий теплообмінник типу У - 0,8;
- 5 - спіральний теплообмінник;
- 6 - пластинчасто - ребристий зварний теплообмінник;
- 7 - кожухотрубчастий теплообмінник типу ТН (з нерухомими решітками);
- 8 - кожухотрубчастий теплообмінник типу ТП (з плаваючою голівкою)

Рис. 3 - Питома металоємність ряду конструкцій теплообмінників залежно від розмірів гріючих поверхонь

Випарювальні апарати та установки неперервної дії можна представити як складні теплообмінні системи, в яких теплові потоки спричиняють зміни агрегатних станів робочих середовищ, що рухаються за циркуляційними контурами апаратів (або їх елементів) та знаходяться в умовах гідродинамічної, термодинамічної та фізико-хімічної рівноваги (з урахуванням введення початкового розчину, виведення продукційних кристалів, введення екстра та відбору сокової пари - з можливістю його подальшого багатократного використання). Теплообмінна апаратура органічно вбудовується в системи випарювання, створюючи рушійну силу процесу.

Обмежена класифікація сучасної промислової випарювальної апаратури представлена схемою (рис. 4), що містить два способи передачі тепла, що принципово відрізняються, за видом випарних пристроїв: за допомогою передачі тепла через непроникну стінку та за допомогою прямого контакту теплоносія з розчином.

Рис.4 -Класифікація основних схем промислових випарників широкого призначення

Методологічний аналіз відомого різноманіття конструкцій випарних апаратів показав, що умовне поділення повного контуру апаратів на конструкторсько-технологічні модулі (КТМ), в яких здійснюються певні технологічні або перехідні процеси, дозволяє в достатньо досяжній формі побудувати кінцеве число типових груп апаратів, об'єднаних як схожістю технологічних призначень, так і спільністю конструктивних рішень. Такий методичний засіб дозволяє не тільки провести аналіз параметричних полів випарної техніки, внутрішньої збалансованості окремих частин апаратів та установок, але і стати основою оптимального проектування конструкцій.

Структурні схеми класифікованих конструкцій випарників (рис. 4), наведені на рис. 5.

Рис. 5 - Структурні схеми випарників складені з уніфікованих конструкторсько-технологічних модулів (КТМ)

1 - гріюча камера; 2 - сепаратор; 3 - циркуляційна труба; 4 - труба скипіння; 5 - електронасосний агрегат; 6 – солевіддільник ; 7 - змішувач паливного газу та повітря; 8 - розподільний пристрій; 9 - ротор плівкового випарника

Аналіз основних структур існуючої промислової випарної техніки (рис. 5) разом з новими конструкторськими рішеннями дозволив оцінити ступінь вивченості процесів в кожному конструкторсько-технологічному модулі, поставити основні завдання наукових досліджень кожного конструкторсько-технологічного модуля та їх сукупності роботи у випарнику або установках, рішення яких дозволяє синтезувати нові схеми та розробити наукові методи їх розрахунків.

Другий розділ присвячено виявленню резервів енергозбереження та аналізу і перспективам розвитку сучасних теплообмінників та випарників.

Про суттєві резерви енергозбереження в галузі можна судити за аналізом вибору та розрахунку конструкторсько-технологічного модуля «гріюча камера». Дослідження експлуатаційних характеристик напруженого стану різних видів кожухотрубчастих теплообмінників показали, що однією з основних причин їх низької конкурентоспроможності є відносно низька інтенсивність теплообміну та різка дисгармонія форм вузла з'єднання достатньо тонких гріючих труб з занадто товстими трубними решітками, які відрізняються за товщиною, як правило, в десятки разів (з відповідним екстремальним сплеском напруги в місцях з'єднання). Ці обставини диктували пошуки нових конструкторських рішень. Такими визначились теплообмінники, в яких гріючий трубчастий елемент виконаний у формі закрученої сплюснutoї труби, сотові або ламельні теплообмінники, використовуванні, наприклад, як гріючі камери випарників (рис. 6).

Рис. 6 - Випарний апарат з ламельною гріючою камерою

Загальна маса таких КТМ на 40 - 50 % менше традиційних трубчастих, а питоме теплове знімання в $2 \div 2,5$ рази вище.

Найбільш раціональній за сучасними досягненнями технології металооброблення та зварювання є розроблення конструкції з'єднання трубного пучка з тонкими трубними решітками, що дозволяє знизити високу напругу в місцях кріплення, повніше використовувати несучу здатність трубної решітки. Таке гармонійне поєднання, пом'якшує також дію термічних деформацій, що знижує металоємність гріючої камери.

Штампування решіток та програмне групове зварювання з'єднань, при автоматичному контролі, дозволяє отримати вищу якість виготовлення при значному зниженні енерговитрат. Металоємність та затрати праці знижені на порядок.

Наукове обґрунтування розрахунку отримано на основі розгляду моделі прогинання вісесиметричної круглої пластини (яка покоїться на пружній підставі, та є сукупністю труб, з'єднуючих обидві решітки), що деформується відповідно до силової реакції труб (рис. 7).

Рис. 7 - Розрахункові схеми деформацій тонкостінних трубних решіток та пучка труб
 а) трубні решітки; б) пружна лінія прогинання решіток; в) пружна підстава - пучок труб;
 г) розрахунковий елемент з'єднання труби з решітками

Рис. 8 - Дослідно-промисловий зразок гріючої камери з тонкостінними трубними решітками

Дослідження впливу параметрів навантаження трубного пучка на деформації і напружений стан тонкостінних трубних решіток дозволило застосувати математичну модель прогину круглої пластини, що покоїться на пружній основі, у вигляді диференційного рівняння четвертого порядку Рейснера

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{2}{x} \cdot \frac{d^3 w}{dx^3} - \left(\frac{1}{x^2} + 2c \right) \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} + \left(\frac{1}{x^3} - \frac{2c}{x} \right) \cdot \frac{dw}{dx} + w = \frac{P_0}{K}, \quad (1)$$

де: x – безрозмірна координата крапки на поверхні решітки, $x = \beta \cdot r$, $\beta = \sqrt{k/D_\psi}$, r – відстань від крапки до центру решітки; r_n – зовнішній радіус решітки; K – коефіцієнт пропорційності зусилля-деформації узагальненої пружності основи; P_0 – найбільший тиск робочого середовища; w – прогинання решітки.

При виконанні граничних умов: $x=0$; $\frac{dw}{dx} = 0$; $x=r_n$; $w=0$ дві з 4-х постійних інтегрування (1) дорівнюють нулю. Тому рішення диференційного рівняння (1) має в функціях Кельвіна вигляд

$$w = C_1 berx + C_2 beix + \frac{P_0}{K}, \quad (2)$$

де: C_1 і C_2 постійні, що визначаються з граничних умов та спільності деформацій.

Проведені здобувачем на основі (2) розрахунки та експериментальні дослідження дозволили побудувати метод розрахунку та створити промислові конструкції випарних апаратів з тонкостінними трубними решітками.

Фрагменти розрахункових моделей та фотографія промислового теплообмінника з тонкостінними трубними решітками і зіставлення вагових показників полегшених конструкцій з традиційними наведені на рисунках 7, 8 та в таблиці 1.

Металоємність стандартних та полегшених випарників

Тип апарата	Номінальна поверхня теплообміну, м ²	Маса апаратів, кг			
		зі стандартними гріючими камерами		з полегшеними гріючими камерами	
		апарат	гріюча камера	апарат	гріюча камера
З природною циркуляцією та винесеною гріючою камерою і зоною кипіння	25	3000	1090	2950	850
	63	6000	1910	5200	1500
	112	8500	3100	7200	2640
	140	11500	4410	9700	3490
З примусовою циркуляцією та винесеною гріючою камерою	63	8300	1960	7500	1550
	125	13000	3640	11500	2700
	200	19100	5570	18100	4140
З природною циркуляцією і винесеною зоною кипіння	80	5600	2850	4000	1800
	125	10500	4850	8000	3500
	250	15000	9400	12000	5600

Аналіз промислових запитів показав, що в багатьох хімічних виробництвах традиційно використовуване обладнання, в основному, з високолегованих сталей та сплавів, є високоенерговитратним, має недостатній термін служби, низьку експлуатаційну надійність. Пошук альтернативних рішень показав, що універсальна хімічна та термічна стійкість фторопласту - політетрафторетілену - як конструкційного матеріалу - дозволяє використовувати теплообмінники, як для процесів теплообміну у високо агресивних середовищах, так і у виробництвах особливо чистих речовин.

Цей матеріал теплообмінника не чинить каталітичного впливу на кінетику хімічних процесів. Гідрофобні властивості сприяють зменшенню заростання робочих поверхонь теплообміну, що забезпечує незмінність коефіцієнта теплопередачі на термін експлуатування, постійність гідравлічного опору, що визначає значне скорочення кінетичних енерговитрат в порівнянні з традиційними рішеннями.

За ініціативою академіка В.І. Атрощенко і проф. Л.Л. Товажнянського для хімічних виробництв та за їх концептуальними науковими ідеями в УкрНДІхіммаш, вперше в Україні були розроблені оригінальні конструкції фторопластових теплообмінників та технології їх виготовлення. В останні роки (за участю і науковим керівництвом здобувача) створено нове ефективне покоління фторопластової теплообмінної апаратури.

На рис. 9 наведена одна з більш відомих створених конструкцій апаратів з гріючими трубами діаметром 2,6 мм, що призначена для штатної експлуатації при робочому тиску до 0,6 МПа та температурі від мінус 70 °С до 200 °С, а в таблиці 2 наведені параметричні дані цієї серії.

Рис. 9 - Кожухотрубчастий фторопластовий теплообмінник

Основні характеристики кожухотрубчастих фторопластових теплообмінників

Номінальна площа поверхні теплообміну, м ²	Діаметр кожуху, мм	Кількість трубок, шт	Довжина трубного пучка, мм
6,3	200	157	1750
20	273	379	3260
20	400	529	1800
32	400	529	2800
40	400	529	3500

При дослідженнях, за участю здобувача, отримано значення впливу забруднень гріючих поверхонь на теплообмін, яке наведено в таблиці 3.

Фізичні параметри кожухотрубчастого теплообмінника

Матеріали гріючої поверхні	Теплопровідність Вт/м·градК	Загальний коефіцієнт теплопередачі в Вт/м·градК при товщинах забруднюючого шару (мм)			
		0	0,025	0,075	0,125
Політетрафторетилен	0,326	557,46	557,46	557,46	557,46
Нержавіюча сталь	22,82	1242,0	1072,0	844,3	700,0
Монель-метал	37,49	1281,2	1105,0	869,0	709,0
Мідно-нікелевий сплав	44,0	1296,0	1115,0	877,0	715,0
Вуглецева сталь	65,2	1320,0	1130,0	883,0	724,0
Нікель	91,28	1336,6	1293,0	890,0	724,0
Латунь	164,63	1353,0	1300,0	890,0	728,0
Мідь	546,05	1369,0	1162,0	900,0	732,0

Показано що, при товщині забруднюючого шару 0,125 мм коефіцієнт теплопередачі мідного теплообмінника на 25 % більше коефіцієнта теплопередачі політетрафторетиленового теплообмінника. При використанні для охолодження річкової або оборотної води шар забруднення може досягти 0,5 ÷ 1,5 мм; при цьому високий початковий коефіцієнт теплопередачі для металевих труб, практично, не має вирішального значення, а феноменальні антиадгезійні властивості фторопласту забезпечують незмінну передачу тепла.

За питомою вартістю (з урахуванням терміну служби) теплообмінні апарати з політетрафторетилену та його сополімерів виявилися конкурентноспроможними теплообмінникам з високолегованих сталей з причини їх повної толерантності (оскільки вони практично, не зношуються) до дії корозійноагресивних робочих середовищ, в яких нормативний термін служби виробу, за ступеню корозійного зносу, з вказаних сталей та сплавів в середньому не перевищує 1 ÷ 3 років (при проектному

терміні експлуатації виробництв 25 ÷ 30 років). Таким чином, матеріаломісткість та енергомісткість комплекуючого теплообмінного устаткування з фторопласту виявляється в 10 ÷ 15 разів нижче ніж традиційного.

Розрахунок гідравлічних опорів рідин можливо проводити за звісною формулою

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{\ell}{d_3} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2g}, \text{ Н / м}^2, \quad (3)$$

за умовою розрахунку коефіцієнта гідравлічного тертя, отриманих в роботі, за залежностями:

$$\text{- для ламінарної течії} \quad \lambda = 62 \cdot \text{Re}^{-0,98}, \quad (4)$$

$$\text{- для перехідної течії} \quad \lambda = 0,47 \cdot \text{Re}^{-0,26}. \quad (5)$$

Тепловий розрахунок рекомендовано обчислювати за формулами:

$$\text{- при } \text{Re} \leq 1800 \quad \text{Nu} = 0,2 \cdot \text{Re}^{0,46}, \quad (6)$$

$$\text{- при } \text{Re} \geq 1800 \quad \text{Nu} = 2,3 \cdot \text{Re}^{0,125}. \quad (7)$$

Графічне значення λ в функції чисел Рейнольдса наведені на рис. 10.

Рис.10 - Графік залежності коефіцієнта гідравлічного опору від критерію Re для фторопластових труб

Резерв енергозбереження за рухом теплоносіїв визначається співвідношенням значень гідроопору при λ_{ϕ} - фторопластових та λ_{τ} - металевих труб. За табличними даними академіка Н.Н. Павловського при діаметрі металевої труби 75 мм (при шорсткості $n=0,014$) коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda_{\tau}=0,06$ при діаметрі труб менше 75 мм λ_{τ} істотно зростає. Для фторопластових труб (на рис. 10), при $\text{Re}=10^4$ відповідно $\lambda_{\phi}=0,03$, тобто при використанні фторопластових труб кінетичні енерговитрати скорочуються не менше, ніж в два рази.

Високий енергозберігаючий потенціал пластинчастих теплообмінників сітчастого-поточного типу (що є узагальненою геометричною моделлю трубчастих, щілинних, стрічково-поточних апаратів) достатньо відомий, але поглиблені теоретичні та експериментальні дослідження структур потенційних вихрових течій, проведені за участю здобувача, дозволили уточнити та оптимізувати методи розрахунку і на цій основі удосконалити конструкції порожнин між пластинами, де здійснюється інтенсивніший, менш енерговитратний, теплообмін.

Розрахунки показали, а експерименти підтвердили доцільність використання на поверхні пластин не тільки гофрованих прямолінійних каналів, але й криволінійних (S-подібної форми), з оптимальними лінійними та кутовими параметрами, що дозволяє при однаковій поверхні теплообміну порівнюваних пластин та тій же квоті тепла, що передається, витратити енергії на транспортування рідини менше до 50 %.

Значні резерви енергозбереження у випарювальній техніці мають апарати зануреного горіння (АЗГ), здатні використовувати до 97 % теплотворної здатності га-

зових, рідких або розпорошених твердих палив. За принципом дії АЗГ характеризуються барботажними процесами, що протікають між спалюваними в рідині газами. Величина міжфазної поверхні складає, до 1000 м² в одному кубічному метрі барботажного шару. Випарювання розчину відбувається при температурі "вологого термометру". Процеси тепло- і масообміну відбуваються, практично, без тепловитрат.

Практичне використання АЗГ дозволяє окрім цільового випуску технологічної продукції повністю виключити скидання промислових стоків, замкнути водяний технологічний цикл, отримувати промислову опріснену воду з морської, мінералізовану, тощо.

У світовій техніці та промисловості накопичено величезний досвід високоекономічного використання АЗГ. Проте у зв'язку з інтенсивним забрудненням повітря окислами азоту, сірки та інше, що утворюються при високотемпературному спалюванні енергоносіїв, запит на виробництво АЗГ зменшується.

В роботі показані нові перспективні можливості використання цього високоєфективного випарювального устаткування виникли у зв'язку з винаходом (що має пріоритет України) АЗГ з роздільним масовим виведенням водяної пари і димових газів (рис. 11) та пріоритетної технічної пропозиції фірми "General Electric", направленої на зниження концентрації оксидів азоту на вихлопі парогазових турбін, шляхом уприскування водяної пари в камеру згорання, що дозволило знизити викид NOx приблизно в 5 разів до норм, що не перевищують ГДК.

Розрахункові обґрунтування теплообміну в барботуючому шарі побудовані на відомих закономірностях взаємодії газу та рідини і складання диференційного рівняння, що описує формування контактного шару на розподільній тарілці.

При константах швидкості утворення та руйнування газових бульбашок - n і m - та часу перебування бульбашок в шарі $\Delta\tau$ – опис піноутворення дозволяє скласти диференційну залежність приросту висоти шару dH від функції малої зміни загальної вісьової швидкості $d\omega$

$$dH = \frac{n}{m} \Delta\tau \cdot d\omega_a, \quad (8)$$

інтегрування якої дає значення висоти шару

$$H = \frac{n}{m} \Delta\tau \cdot \omega_a + C,$$

Рис. 11 - Контактно-диференційний випарний апарат зануреного горіння

де з початкових умов $H(\omega_0)=0, C=0$.

З урахуванням співвідношень $\frac{n}{m} = \frac{\rho_{жс} - \rho_{\bar{b}}}{\rho_{жс} - \rho_z}$ та

$\rho_{\bar{b}} = \varphi \cdot \rho_z + (1-\varphi) \cdot \rho_{жс}$, Алабовським А.Н. та Удимово П.Г. для традиційних АЗГ одержана емпірична формула висоти барботуючого шару

$$H = 0,83 \cdot \left(\frac{n}{m} \cdot \omega_a \right)^{0,6}. \quad (9)$$

Сукупність результатів досліджень дозволила побудувати залежність тепловіддачі від газу до рідини, яку обчислюють за формулою

$$Nu=0,2 \cdot Re^{0,55} \cdot K_{\phi}^{0,3}. \quad (10)$$

Розрахункову глибину занурення пальника визначають залежністю

$$h = \frac{Q}{\alpha \cdot a \cdot F_e \cdot \Delta t}. \quad (11)$$

Величину теплового потоку, який передається, обчислюють за формулою

$$Q = \alpha \cdot F_e \cdot \Delta t, \quad (12)$$

де Δt - температурний перепад; $\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{\ln T}$, t_1 та t_2 - температура газів на вході у барботажний шар та виході із нього; α - коефіцієнт тепловіддачі від газів до води; a - удільна поверхня фаз; F_e - межфазна поверхня теплообміну.

Управління процесом контактної-диференційного випарного апарату АЗГ здійснюється в автоматичному режимі за заданою програмою. Рідина, що нагрівається факелом полум'я та гарячими газами до температури нижчої за температуру кипіння, прямує під тиском P_1 через барометричну трубу (яка виконує функцію і труби вскипання) у сепаратор, де при тиску P_2 рідина вскипає і водяна пара прямує для технологічного використання (зокрема, можливо, і як екстра-пара для подальшого багатоступінчастого випарювання розчинів); димові гази, з незначною кількістю водяної пари, захопленої при випарюванні рідини без кипіння, з температурою на $1 \div 2$ °С нижче ніж нагріта в АЗГ рідина, під тиском P_1 видаляється з апарату з метою подальшого очищення, утилізації та віддачі низькопотенційного тепла для використання як вторинних теплових ресурсів. Загальні енерговитрати, в наведеному випадку, скорочуються більш ніж в 2 рази, в порівнянні з традиційними парогенераторами котельного типу.

Третій розділ присвячений дослідженню теоретичних питань гідродинаміки та теплообміну в каналах складних форм.

У числі найбільш ефективних проривних конструкторських та технологічних рішень сучасної теплоенергетичної техніки треба вважати створення ряду модифікацій компактних пластинчастих теплообмінників, що дозволяють розміщувати до 1000 кв.м (та більше) гріючої поверхні в одному кубічному метрі об'єму теплообмінного апарату. Базуючись на науковій інформації, накопиченою науковою школою НТУ «ХП», дослідженнях та досвіді здобувача, світовими тенденціями розвитку теплообмінних пристроїв, проведений структурний аналіз перебігу теплоносіїв в робочих просторах найбільш ефективних пластинчастих теплообмінників.

Треба зазначити важливу особливість: площі будь-яких перпендикулярних подовжній вісі живих перетинів міжпластинних каналів рівновеликі між собою та відрізняються лише формою, що, певною мірою, пояснює феномен високої теплоенергетичної ефективності теплообміну сітчасто-потоківих теплообмінників, який визначається (за ствердженням С. Гольдштейна) безвідривним перебігом рідини в каналах такого типу.

Цей вид конструкції у аналітичному плані характеризує роботу різних типів теплообмінників.

Наприклад, при куті нахилу гофри до подовжньої осі пластини - φ_1 та куті нахилу бокової стінки гофри до площини пластини - α_1 маємо:

- $\varphi_1 = 0, \alpha_1 = 0$ - щілинних теплообмінників з гладкими пластинами та ламельних;

- $\varphi_1 = \pi/2, \alpha_1 = \text{const}$ - стрічково-поточних теплообмінників;

- $\varphi_1 \neq 0, \varphi_1 \neq \pi/2, \alpha_1 = \text{const}$ - стрічково-поточних теплообмінників та витих теплопередаючих труб.

У трубчастих та плоских щілинних каналах потік характеризується одновимірним рухом, в стрічково-поточних двовимірним - (у вигляді звивистої плоскої стрічки), в сітчасто-поточному - тривимірним, - при якому потік обтікає за звивистими лініями опорні точки доторкання вершин, гофрів двох пластин, зображених на рис. 12.

АксонOMETричне уявлення про простір між пластинами та схеми руху теплоносіїв наведено на рис. 12 а, б, в, г. Умовно чорним кольором представлена частина потоку, що поступила в одну половину живого перетину 1, в даному випадку, нижню, - а білим - в другу (верхню). Всі подальші перетини (до дев'ятого) показують зсування об'ємів, позначених «половинок» в каналі (відповідно до форми проточних ділянок) за ходом руху потоку.

Порожнина між пластинами утворюється парою уніфікованих пластин. Поздовжні ряди точок контакту вершин гофрів визначають межі елементарних каналів, в яких, за умовами симетрії, рухається теплоносій. Траєкторії руху потоків теплоносіїв усередині цих каналів є двохзахідні конгруентності гвинтові лінії, особливостями яких є перемінні переходи теплоносія (на поздовжніх межах каналу) з однієї пластини на іншу.

Рис. 12 - Схемний рух потоків, що поступають на кожну із пластин міжпластинної порожнини

а) – рух потоку, що поступив в перетин 1 «умовно чорної половини»;

б) – рух потоку, що поступив в перетин 1 «умовно білої половини»;

в) - загальний рух потоків за каналом;

г) - об'ємне зображення осередку, що ідентифікується

Реальний потік в звивистому каналі пластинчастого теплообмінника можна представити структурно синтезованим у вигляді набору елементів його прямолінійних ділянок з плоскопараллельним рухом, сполучених між собою в місцях розміщення джерел та стоків таким чином, що стік одного елементу є джерелом для по-

дальшого, - створюючи умови багатократного стікання та нового формування граничного шару.

Геометричне прокреслювання живих перетинів ідентифікованого осередку позовжнього каналу виразно відображає зміни форм проточної частини (без зміни площ живих перетинів). Треба також відзначити, що з бокових сторін кожен з позовжних каналів (окрім двох крайніх) безпосередньо межують з двома ідентичними позовжними каналами (як за геометричними формами, так і за гідродинамічними картинами течій), що дозволяє припускати про відсутність (на достатньому віддаленні від колекторних отворів) помітних поперечних перетікань між суміжними позовжними каналами, тобто $\Delta W_n = 0$.

Описуючи стаціонарний вимушений конвективний рух та теплообмін представляється зручним скористатися законом подібності для теплопередачі, запропонованими Л.Д. Ландау та Є.М. Ліфшицем, отриманим для умов перебігу нестискуваних рідин, оточуючих тверді поверхні в діапазоні температур, при яких їх фізичні властивості можна вважати незалежними від температури, а зміною температури потоків від дисипації енергії можна нехтувати (зважаючи, що вони незначні).

Математичний опис, що включає рівняння теплопереносу разом з рівнянням Нав'є-Стокса та рівнянням безперервності представлено системою (13):

$$\begin{aligned} W \nabla T &= \chi \cdot \Delta T; \\ W \nabla W &= -\nabla \frac{P}{\rho} + \nu \Delta W; \\ \operatorname{div} W &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

де: χ - температуропровідність, ν - кінематична в'язкість, ρ - щільність.

У більшості промислових виробництв пластинчасті теплообмінники - як апарати високоінтенсивної дії штатно експлуатуються при турбулентних режимах руху теплоносія, при яких всі параметри течії, змінюються в часі та просторі, строго кажучи, не можна назвати стаціонарним. О. Рейнольдс, ґрунтуючись на рівняннях Нав'є-Стокса, сформулював рівняння турбулентного перенесення, пов'язавши актуальні значення гідромеханічних величин та усереднених за часом пульсацій отримав систему рівнянь, що описують конвективне перенесення усередненими значеннями параметрів течій, - рівняннями нерозривності, Рейнольдса та енергії.

Проте теоретичних рішень замикання систем отриманих рівнянь, що дозволяють повністю вирішити задачу, немає. Для рішення більшості практичних завдань турбулентного теплообміну користуються напівемпіричними математичними моделями, заснованими на гіпотезах градієнтного перенесення. Їх концептуальні положення і методи інженерного використання розглянуті в першому розділі за умови представлення міжпластинної порожнини у вигляді пористого середовища в щільному об'ємі, що характеризуються визначуваними коефіцієнтами опору руху.

Розрахунок тепловіддачі та тертя для описаного плоскопаралельного перебігу нестисної рідини зводиться до рішення системи рівнянь (13) та наступних задач гідродинаміки:

1. Потенційної течії за осередком довжиною L_k плоскопаралельного потоку із швидкістю W_k , накладеного на джерело та стік за межами каналу у вигляді комплексної функції

$$\omega_z = \varphi + i\psi = W_k \left\{ x + \frac{h}{4\pi} \ln \sqrt{\frac{\left(x + \frac{b}{2}\right)^2 + y^2}{\left(x - \frac{b}{2}\right)^2 + y^2}} + i \left[y + \frac{h}{4\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{y}{x + \frac{b}{2}} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x - \frac{b}{2}} \right) \right] \right\}, \quad (14)$$

де: ω_z - комплексна функція; φ - потенціал швидкості; ψ - функція струму, а проєкції швидкостей визначаються похідними комплексної функції за вісями координат

$$W_x = \frac{d\varphi}{dx}, \quad W_y = \frac{d\psi}{dy}. \quad (15)$$

2. Поперечного підкручення потоку, яке визначається інтенсивністю вихрового шару, що вбудовується в місце розриву швидкостей потоків у ядра вихрю.

Складова швидкості у напрямку осі X від суміжної швидкості плоскопаралельного потоку W_k та швидкості поперечної підкрутки W_n (рис. 13)

$$W_x = W_k - W_n \cdot \left(1 + \frac{y - r_0}{\delta} \right) + W_n. \quad (16)$$

Тоді вихор швидкості, що має напрямок, перпендикулярний площині XOY , можна представити у вигляді

$$\frac{1}{2} \operatorname{rot} W = \Omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_y}{\partial x} - \frac{\partial W_x}{\partial y} \right) = \frac{W_k - W_n}{\delta}$$

Рис. 13 - Схема вихрового шару

(17)

У середині шару кутова швидкість обертання частинок Ω має постійне значення, відмінне від нуля, поза шаром $\Omega = 0$; за теоремою Стокса, циркуляція за замкнутим контуром дорівнює подвоєній інтенсивності вихрю за площею, що охоплюється контуром

$$\int_{(L)} W_x \cdot dS = \int_{(\sigma)} \Omega_z \cdot d\sigma. \quad (18)$$

Інтегрування дозволяє отримати значення швидкості поперечного підкручення потоку в каналі (рис. 14)

$$W_n = W_k \cdot \sin 2\varphi \frac{1 + \sin 2\alpha}{1 + \sin 2\alpha + \pi/2 \cdot \cos \alpha}.$$

Рис. 14 - Швидкість поперечного підкручення

3. Додатковою поздовжньою

швидкістю уздовж осередку, що індукується вихровим шаром, визначається формулою Біо-Савара

$$W_u = \frac{W_k}{2\pi^2} \cdot \sin^2 \varphi \cdot \cos \alpha. \quad (19)$$

Підставляючи отриману сумарну поздовжню швидкість уздовж елементарного осередку, обчислюємо тепловіддачу α

$$\alpha = Z \cdot \frac{\left[\text{Re}_k - XA + 36,9(XA)^{0,625} \right]^{0,8}}{\text{Re}_k^{0,5} \text{Re}_k^{0,5} + \left[\text{Re}_k - XA + 36,9(XA)^{0,625} \right]^{0,4} \cdot P}, \quad (20)$$

де: $Z=0,037 \cdot C \cdot \rho \cdot W_k$, ρ - щільність середовища, C - питома теплоємність середовища, A - характеристика ступеня турбулізації потоку, W_k - серединна швидкість потоку в каналі

$$W_k = \frac{V}{B \cdot h \cdot \cos \varphi},$$

V - об'ємна витрата середовища через один міжпластинний канал

$$P = \left[\text{Pr} - 1 + \ln 0,83 \cdot \text{Pr} + 0,17 \right],$$

Pr - критерій Прандтля середовища

$$\text{Re}_k = \frac{W_k \cdot t}{\nu \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi},$$

X - коефіцієнт форми пластини

$$X = \frac{\sqrt{\frac{t^2}{4 \cdot h^2} + \cos^2 \varphi}}{\sin \varphi \cdot \cos^2 \varphi}.$$

Загальні втрати натиску за довжиною пластини визначаються формулою

$$P_{\text{сум}} = 2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot W_c^2 \cdot \frac{H}{t \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi} + 0,45 \cdot \rho \cdot W_c^2 \cdot \frac{H}{t} \cdot \varphi^2 \cdot \sin \varphi. \quad (21)$$

Виразивши C_x через прийняті параметри характеристики потоку, остаточно отримуємо

$$P_{\text{сум}} = 0,148 \cdot \rho \cdot W_c^2 \cdot \frac{H}{t} \cdot \left\{ \frac{\text{Re}_c - XA + 36,9 \cdot (X \cdot A)^{0,625} \bar{0},8}{\text{Re}_c \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha} + 3 \cdot \varphi^2 \cdot \sin \varphi \right\}, \quad (22)$$

де:

$$W_c = W_k + W_{\text{инд.}} = W_k \cdot \left[1 + \frac{2 \sin^2 \varphi}{\pi} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta_p}{\pi} \right) \right].$$

Отримані теоретичні рішення дозволяють використовувати можливості зниження питомих енерговитрат за рахунок формування зручнообтічних теплопередаючих поверхонь при підвищенні інтенсивності цільової передачі тепла, здійснити оптимізацію форм теплопередаючих поверхонь. Випробування показали можливість зниження енерговитрат до 50 %.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням та аналізу отриманих результатів, розглянуто для співставлення також відомі концептуальні схеми течій.

В дослідженнях для визначення параметрів течії в пористих середовищах, умовно визначених комірчастою структурою порожнини між пластинами, що знаходиться між гладкими паралельними пластинами, як нелінійним аналогом осередку Хеле-Шоу у формі пластинчастого теплообмінника, отримана загальна картина течій з урахуванням впливу дискретності колекторних отворів та оцінки корегуючих коефіцієнтів для визначення швидкості.

Чисельним методом установлення досліджено вплив змінних коефіцієнтів опору в поздовжньому та поперечному напрямках на загальну картину течії - в міжпластинній порожнині (зокрема типу «альфа-флекс»), з метою можливого використання в практичних цілях. Інтенсивність передачі тепла при пластинах з кутом $\varphi_2 = 70^\circ$ основного поля пластини (рис. 16) майже вдвічі вище ніж при куті $\varphi_1 = 60^\circ$ (рис.15), при рівних кутах φ_1 на вході та виході.

Всього досліджено 3 математичні моделі тепловіддачі та гідроопору ізентропійного перебігу однофазної нестискуємої рідини в міжпластинних просторах сітчасто-поточних теплообмінників, які описують течії в ізотропній та анізотропній структурах міжпластинних порожнин, що дозволило досліджувати поздовжні та поперечні розподіли тиску та швидкостей руху рідини.

Проведене в роботі дослідження з використанням третьої математичної моделі (14) дозволило отримати якісно нову картину течій, що утворюються при обтіканні контактуючих гофрів двох суміжних пластин в просторі між пластинами, зіставлення її з реальним перебігом струменів в прозорих моделях (рис. 17).

Рис. 15 - Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі α та теплопередачі K на полі пластини для варіанту $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 60^\circ$

Рис. 16 - Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі α та теплопередачі K на полі пластини для варіанту $\varphi_1 = 60^\circ$; $\varphi_2 = 70^\circ$ (φ_1 - на вході та виході потоку, а φ_2 - на основному полі пластини)

- Рис. 17 - Кінематична модель потоку в міжпластинному просторі
- а) схема концептуальної течії за осередками, утворених нульовими лініями струму, що відокремлюють потік (у кожному каналі) від зовнішнього;
 - б) схема течії за геометрично створеними осередками;
 - в) реальна течія - в прозорій моделі (з підфарбованими струменями).

На лабораторних стендах УкрНДІхіммаш, за участю здобувача, проведені випробування дослідно-промислових зразків теплообмінників з пластинами $0,3 \text{ м}^2$ та $0,6 \text{ м}^2$ п'яти різних варіантів гофрування поверхні пластин, що мають кути нахилу прямолінійних гофрів від 15° до 75° , та одного варіанту з криволінійними гофрами S-образної форми, в яких кожен канал має кут нахилу за поздовжньої вісі пластини, що безперервно змінюється (вхід гарячої рідини розташований з боку вузьких каналів пластини, холодної рідині - з боку широких каналів).

В цьому випадку теплоенергетична ефективність для в'язких рідин може бути підвищена у декілька разів. При випробуваннях на воді, в діапазоні температур теплоносіїв від 20°C до 80°C , теплоенергетичний показник підвищився до 50% , т.ч. при однакових енерговитратах кількість передаваної цільової теплової енергії збільшилася в півтора рази.

Забезпечення експлуатаційних гарантій та зменшення енерговитрат привело до необхідності розкриття механізму роботи конструкції розбірного пластинчастого теплообмінника, що знаходиться під змінним тиском, як багатокамерної пружної герметичної системи, складеної з набору пластин, прокладок та плит стисканих загальним замикаючим зусиллям.

Можливість появи зазору $\Delta\delta_j$ між пластинами та його розміри визначаються залежністю

$$\Delta\delta_j = K_1 \left[F \cdot p_j - \frac{\Delta L - \sum_{i=1}^j f p_i + F \cdot \frac{K_1 \cdot K_3}{K_1 + K_3} \sum_{i=1}^j p_i}{K_2 + m \cdot \frac{K_1 \cdot K_3}{K_1 + K_3}} \right], \quad (23)$$

де: F - площа пластини, обмежена прокладкою; p_i - тиск в i -той камері; ΔL - різниця термічних деформацій стислих та розтягнутих частин системи; K_1, K_2, K_3 - коефіцієнти пружної податливості елементів системи.

Для перевірки отриманих розрахункових залежностей проведені експерименти на 24-х камерному універсальному стенді (рис. 18), що підтвердили отриману закономірність (з погрішністю, що не перевищує 10%).

Рис. 18 - Загальний вид випробувального стенду багатокамерних герметичних систем

Дослідження дозволили істотно розширити сфери застосування пластинчастої теплообмінної апаратури в хімічній, нафтогазовій та суміжних галузях промисловості, теплоенергетична ефективність якої в $2,5 \div 3$ рази вища ніж у традиційно вживаних трубчастих теплообмінних пристроїв.

Досліджено питання щодо будови високоефективних випарників плівкового типу с багатократним використанням тепла гріючої пари. Конструктивно ці апарати виконані у вигляді набору теплообмінних елементів, які розташовані у вигляді коаксальних конічних, циліндричних або вертикальних плоских пластин. На ефективність роботи теплообмінного елемента, виконаного у вигляді вертикального напівциліндру, впливає ряд конструктивних та технологічних факторів, а саме: зменшення поперечного перетину теплообмінного елемента за рухом пари від периферії до центру та збільшення приросту товщини стікаючої плівки; зменшення товщини шару за рахунок випарювання розчинника; зміна щільності теплового потоку від гріючої пари до розчину, що пов'язано зі зміною товщини плівки розчину; зміною температури кипіння розчину та його концентрації.

З метою визначення впливу цих факторів була розроблена математична модель роботи конічного та, як окремих випадок за $R_0 = \text{const}$ та $\alpha = 0$, плоского теплообмінного елемента.

Експерименти були проведені на конусних елементах з кутами розкриття конфузору $2\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$. Радіус вхідного отвору $R_{\text{вх}} = 0,27$ м та довжина елемента $L = 0,474$ м (рис. 20). Конусні елементи виготовлені із сталюого листу товщиною $h_k = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, які мають теплопровідність $\lambda_k = 16,2$ Вт/(м·К). Над конусом розташовано необігріваний циліндричний переливний розподільчий пристрій висотою $d_0 = 0,06$ м (рис. 19).

Рис. 19 - Схема течії плівки рідини

Експерименти проводилися за змінням витрат рідини у межах $Q = (7 \div 25) \cdot 10^{-5}$ м³/с та різниці температур $\Delta T = T_s - T_a$ від 5 °К до 25 °К.

Результати експериментів були використані для корегування рівнянь моделі течії та теплообміну стічної та випарювальної плівки рідини у конфузорі.

Течія рідини описана в біконичних координатах, вершина яких збігається з вершиною конусу (рис. 19), та визначається за формулами

$$\begin{aligned} z' &= R \cdot \cos \alpha + X \cdot \sin \alpha, \\ y' &= (R \cdot \cos \alpha - X \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \varphi = \Omega \cdot \sin \varphi, \\ x' &= (R \cdot \sin \alpha - X \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \varphi = \Omega \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (24)$$

Рівняння нерозривності для аксіальносиметричної течії має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial R} \cdot \Omega \cdot V_R + \frac{\partial}{\partial X} \cdot \Omega \cdot V_X = 0. \quad (25)$$

Використовуючі безрозмірні змінні та параметри:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{R}{d}; & \xi_0 &= \frac{R_0}{d}; & \chi &= \frac{X}{d}; & d &= 4 \cdot h_0; & h_0 &= \left[\frac{3 \cdot \mu \cdot Q}{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot R_0 \cdot \sin 2\alpha} \right]^{1/3}; \\ v_\xi &= \frac{V_R}{V_0}; & v_\chi &= \frac{V_X}{V_0}; & V_0 &= \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot h_0 \sin \alpha}; & \Theta &= \frac{(T - T_a)}{\Delta T}; & \text{Re}_0 &= \frac{\rho \cdot V_0 \cdot d}{\mu}; \end{aligned}$$

$$\text{Fr} = \frac{V_0^2}{g \cdot d}; \quad \delta = \frac{h}{d}; \quad \text{Bi} = \frac{K \cdot d}{\lambda_{\text{ж}}}; \quad \text{Ste} = \frac{c \cdot \Delta T}{\Delta H}; \quad \Delta T = T_s - T_a; \quad \text{Pe} = \frac{V_0 \cdot d}{a}.$$

отримали рівняння руху та теплообміну у вигляді

$$\text{Re} \left(v_{\xi} \cdot \frac{\partial v_{\xi}}{\partial \chi} + v_{\chi} \cdot \frac{\partial v_{\chi}}{\partial \chi} \right) = \frac{\partial^2 v_{\xi}}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial \chi} \cdot \left(\sigma \cdot \frac{\partial v_{\xi}}{\partial \chi} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\sigma} \cdot v_{\xi} \right) + \frac{\text{Re}}{\text{Fr}} \cdot \cos \alpha, \quad (26)$$

$$v_{\xi} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} + v_{\chi} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \chi} = \frac{1}{\text{Pe}} \cdot \left[\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial \chi} \cdot \left(\sigma \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \chi} \right) \right], \quad (27)$$

де: $\sigma = \xi \cdot \sin \alpha - \chi \cdot \cos \alpha$.

Змінив на $l = \xi_0 - \xi$, отримано рівняння, що визначає товщину плівки

$$\frac{d\delta}{dl} = \frac{1}{48 \cdot \delta^2} \cdot \frac{\text{Ste}}{\text{Pe}} \cdot \text{Nu} + \frac{\delta}{3 \cdot \xi_0 - 1}. \quad (28)$$

Вплив хвилястості на випарювання плівки за різними значеннями кута розкриття конфузору, витрати вхідної рідини та різниці температур визначали відповідно до значення питомого зняття пари W .

Для розрахунку теплообміного устаткування, використовують середнє число Нуссельта, яке при теплообміні без випарювання визначається за формулою

$$\bar{\text{Nu}}_{\text{r}} = \frac{\text{Bi}}{1 - \varepsilon_0^2} \cdot \left[1 - \varepsilon_0^2 - \frac{3}{10} \cdot \text{Bi} \cdot 1 - \varepsilon_0^{5/3} + \frac{3}{32} \cdot \text{Bi}^2 \cdot 1 - \varepsilon_0^{4/3} - \frac{1}{32} \cdot \text{Bi}^3 \cdot 1 - \varepsilon_0 + \frac{3}{256} \cdot \text{Bi}^4 \cdot 1 - \varepsilon_0^{2/3} \right] - \frac{3}{512} \cdot \text{Bi}^5 \cdot 1 - \varepsilon_0^{1/3} + \frac{3}{2048} \cdot \text{Bi}^6 \cdot \ln \frac{\text{Bi} + 4}{\text{Bi} + 4 \cdot \varepsilon_0^{1/3}}. \quad (29)$$

Для визначення розрахункової залежності $\bar{\text{Nu}}$ під час випарювання за допомогою рівняння

$$\frac{d\delta}{d\varepsilon} = \frac{1}{48 \cdot \delta^2} \cdot \xi_0 \cdot \frac{\text{Ste}}{\text{Pe}} \cdot \text{Nu} - \frac{1}{3 \cdot \varepsilon} \quad (30)$$

проведені чисельні експерименти, за результатами яких побудовані регресійні залежності $\bar{\text{Nu}}$ для кута розкриття конфузору $10^\circ < 2 \cdot \alpha < 45^\circ$

$$\bar{\text{Nu}} = 0,8 \cdot 3,5 - \varepsilon_0 \cdot S^{0,02} \cdot \text{Bi}^{0,24}, \quad (31)$$

з середньоквадратичним відхиленням від експерименту до 12 %. Відносну довжину шляху випарювання в цьому випадку можна оцінити залежністю

$$\varepsilon_v = 1 - 0,29 \cdot 0,93 - S + 0,32 \cdot S^2 - 0,032 \cdot S^3 \cdot \text{Bi}^{-0,047}. \quad (32)$$

Для конфузору $45^\circ < 2 \cdot \alpha < 100^\circ$ маємо

$$\bar{Nu} = 3,51 \cdot \left[\varepsilon_0 - 0,1536 + 0,83 \cdot (1 - \varepsilon_0)^2 \right] \cdot S^{0,05} \cdot Bi^{0,115}, \quad (33)$$

з точністю до 14 %. Відносна довжина шляху випарювання дорівнює

$$\varepsilon_v = 1 - 1,4 \cdot (0,48 - S + 0,68 \cdot S^2 - 0,1 \cdot S^3) \cdot Bi^{-0,02}. \quad (34)$$

Отримані також регресійні залежності для широкого діапазону кутів розкриття конфузору $10^\circ < 2 \cdot \alpha < 100^\circ$

$$\bar{Nu} = 2,51 \cdot \left[\varepsilon_0 - 0,056 + 3 \cdot (1 - \varepsilon_0)^2 - 2,41 \cdot (1 - \varepsilon_0)^3 \right] \cdot S^{0,024} \cdot Bi^{0,224} \cdot (\cos \alpha)^{0,383}, \quad (35)$$

з середньоквадратичним відносним відхиленням до 16 % та для відносної довжини шляху випарювання

$$\varepsilon_v = 1 - 1,35 \cdot (0,48 - S + 0,8 \cdot S^2 - 0,23 \cdot S^3 + 0,02 \cdot S^4) \cdot Bi^{-0,0432}. \quad (36)$$

Наведені в цьому розділі дослідження та складені математичні моделі розрахунку теплообміну, гідроопору, концентрації розчинів, виділення кристалів за природною, примусовою та змішаною циркуляцією використовують при створенні сучасних хіміко-технологічних енергетичних систем. У числі створених оригінальних енергозберігаючих випарювальних установок вельми ефективними виявилися апарати багатократного використання пари в єдиному агрегаті, що мають циліндрові, конічні та плоскі гріючі поверхні.

П'ятий розділ присвячено створенню нових поколінь енергозберігаючого теплообмінного хімічного та нафтогазохімічного устаткування, випарювальних установок та виробництв, їх стандартизації та багатосторонньої оцінки споживчої якості.

Показані очікувані масштаби економії енергоносіїв на хімічних виробництвах країни та видані рекомендації щодо їх оптимального використання з метою ресурсозбереження та охорони довкілля за рахунок максимального використання вторинних енергетичних ресурсів (в тому числі, низькопотенціального тепла); створення замкнутих технологічних водяних і газових циклів, зниження маси технологічних відходів та виробництвом з них товарної продукції.

Отримані теоретичні рішення, їх експериментальна перевірка та узагальнений промисловий досвід дозволили підвищити ефективність та технічний рівень арсеналу теплообмінної та випарювальної техніки до конкурентоспроможного:

1. Розроблено та освоєно, впроваджено в виробництво випарні установки зануреного горіння продуктивністю до 20 т/годину випареної води. Вони мають високі показники використання тепла згорання $95 \div 97$ %. Це дозволило вирішити ряд масштабних важливих проблем, у тому числі і ті що, відносяться до охорони навколишнього середовища (Сумський ОАО „Хімпром”, Кримський ОАО „Титан” та ін.). Створена конструкція дозволяє здійснити якісне очищення пари від димових газів та підвищити енергозбереження за рахунок багатократного використання тепла в по-

дальших апаратах поверхневого типу. Створені АЗГ можуть бути використані як парогенератори в системах теплопостачання, потужністю до 7,5 МВт, а в портативній модифікації (на автоплатформах) для підвищення видобутку нафти до 10 %, за рахунок подачі в родовища горячої технологічної води.

2. Введено в експлуатацію теплообмінники і випарні апарати та багатокорпусні автоматизовані установки, призначені для випарювання сірчаноокислих розчинів лугів та цинку, екстракційної фосфорної кислоти (з виділенням фосфогипсу), електролітичних лугів (з виділенням хлоридів натрію і сульфату натрію), нейтрально - сульфідних лугів на ряді підприємств целюлозно - паперової промисловості, дозволило використовувати значні резерви енергозбереження та підвищити охорону навколишнього середовища.

3. Розроблено пропозиції для переоснащення хімічної, нафтогазохімічної та суміжних галузей промисловості новим високоефективним устаткуванням та комплексними випарними установками з програмними системами управління.

4. Розроблено нормативні документи на типо-розмірні ряди створеного обладнання.

Показано розширення промислових областей застосування нового енергозберігаючого теплообмінного устаткування випарних установок, що забезпечують не тільки цільову технологічну передачу теплової енергії (з урахуванням методу пінч-аналізу), але і замкнуті цикли використання технічної води при максимальній утилізації вторинних теплових ресурсів (у тому числі низькопотенційного тепла), що забезпечує необхідні екологічні умови. Очікувані масштаби енергозбереження складають, за балансовими розрахунками (по галузевим статистичним даним), тільки за рахунок зниження матеріалоємності устаткування, що випускається, - приблизно 3 млн. тонн умовного палива та за рахунок енергозбереження при промисловій експлуатації теплообмінників, випарників і використанні вторинних енергоресурсів до 3,7 млн. тонн у.п. та 2 млрд.м³ природного газу.

Шостий розділ присвячено сучасному вибору конструкційних матеріалів, оцінці досягнутого технічного рівня створеного теплообмінного устаткування та конкурентоспроможності вітчизняної машинобудівної продукції.

Для створення новітніх технологій нафтогазохіміпереробки, забезпечення їх сучасним надійним енергозберігаючим обладнання науково обгрунтовані, експериментально та практично підтверджені систематизовані рекомендації для вибору конструкційних матеріалів, високотехнологічних засобів їх зварювання, високої міцності, корозійної, ерозійної та термічної стійкості і довговічності. Розроблено рекомендації і галузеві норми за технічними, технологічними аспектами та енергозбереженню.

Робота по створенню нових та оптимальному використанню корозійностійких конструкційних сталей та сплавів, виконувалась за комплексною програмою Інститута Електрозварювання НАН України ім. Є.О. Патона, ВАТ "УкрНДІхіммаш" (з особистою виконавчою участю здобувача) та фірми "Тіссен Крупп" (ФРГ). Результати роботи впроваджені в хімічні виробництва.

У сьомому розділі представлені науково-практичні аспекти промислового використання енергозберігаючих розробок. Отримані в роботі теоретичні закономірності та велика кількість експериментальних даних є науковою основою створення

перспективних видів та конструкцій енергозберігаючого тепло- та масообмінного обладнання нового покоління. Деякі з них аналітично розглянуті у розділах 2 ÷ 4, де наведені закономірності течій теплоносіїв та теплообміну робочих середовищ, що дозволяють не тільки застосувати процеси тепломасопереносу у розглянутих видах обладнання, але й прогнозувати їх здійснення в інших умовах та видах апаратурного оформлення.

Нові винаходи (розроблені під керівництвом та за участю здобувача) пластинчастого випарника для хімічної та суміжних отраслей промисловості при збереженні техніко-економічної гідності пластинчастих теплообмінників та характерних особливостей випарювальної апаратури відкривають шлях реалізації випарювальних апаратів, об'єднаних єдиною концептуальною формулою винаходу. Формула винаходу утримує об'єднуюче значення технічної ідеї, яка має 12 суттєвих відмінностей, що визначають цільовий напрямок оптимального використання випарної техніки в галузі. У базовій схемі (рис. 20) пластинчастий випарник складається з труби скіпання випарюваного розчину, яка розташована над пластинчастою камерою, при цьому верхній зріз труби вскіпання, що розташований на рівні розчину в корпусі випарника, а вхід упареного розчину та його вихід розташовані відповідно зі сторін нижчого та верхнього торців пакету пластин.

В інших типах винаходів випарник може бути виконано з розборною та зварювальною гріючою камерою, яка забезпечує роботу випарників з кипінням між пластинами, з під'ємною та стікаючою плівкою в міжпластинному просторі.

Визначає інтерес винахід на пластинчастий випарний апарат з багаторазовим використанням тепла.

Суттєвість винаходу є у тому, що пластинчастий випарник має пакет пластин, що розміщений між стискуваними плитами, патрубків для підведення гріючої пари та розчину, відведення випарюваного розчину та конденсату. Пакет пластин розподіляється на секції ступені випарювання, при цьому кожна секція має три пластини. Винахід дозволяє використовувати вторинну пару попередньої секції, яка обігріває наступну секцію, та забезпечує багатократне використання гріючої пари.

Рис. 20 - Базова схема пластинчастого випарного апарату

Зниженню металомісткості та підвищенню енергоефективності вітчизняних пластинчастих теплообмінників, які можуть працювати під тиском до 3,2 МПа, дозволяє патент на перехреснопоточний теплообмінник. Типорозмірний ряд теплообмінників з трьохвидів пластин (рис. 21, 22) поставлено на виробництво у 2008 р. на ВАТ „Завод „Павлоградхіммаш”.

Рис. 21 - Пластинчастий теплообмінник

Рис. 22 - Пакет пластин

На основі наведених вище науково-практичних основ нових інженерних методів проектування теплохімічного обладнання розроблено за участю здобувача 51 державних та міжнародних стандартів на теплові, гідромеханічні, міцностні, деформаційні методи розрахунків, а також практичні рекомендації для корозійній та ерозійній стійкості матеріалів. Розроблені стандарти типів, параметрів та конструкцій теплообмінних та випарників та випарювальних установок нового енергозберігаючого устаткування.

Сумарна кількість розроблених стандартизованих типо-розмірів конструкцій і пристроїв за параметричними полями всіх видів теплообмінних та випарювальних апаратів налічує більш ніж 10 тисяч типорозмірів. Розроблені теоретичні та практичні методи і заходи енергозбереження поставили нові вимоги до підвищення рівня кваліфікації розробників і обслуговуючого персоналу виробництв. За участю здобувача створено навчальний цикл підготовки наукових, інженерно-технічних працівників галузевих НДІ та промислових підприємств, а також стажування викладачів та студентів у філії кафедри хімічної техніки та промислової екології НТУ «ХП» у ВАТ «УкрНДІхіммаш».

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації отримані науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливу науково-прикладну комплексну проблему, що полягає в розробці теоретичних основ, постановці й рішенні задач гідродинамики та теплообміну в міжпластинному просторі для сітчато-пластинчатих теплообмінників, тепловіддачі при випарюванні та нагріву в апаратах з гравітаційною плівкою на коаксіально розташованих конічних та вертикальних плоских поверхнях теплообміну з багаторазовим використанням тепла гріючої пари, розрахунку теплообміну та гідроопору в теплообмінниках з політетрафторетилену (фторопласту), випарювання у випарниках зануреного горіння. Теоретично обґрунтована та практично доведена можливість, при створенні представленої в роботі перспективної теплохімічної техніки і технології, істотної економії енергоресурсів, здатній впливати на підвищення конкурентоспроможності товарної продукції України.

Науково-практичні результати, які отримані в роботі:

1. Сформовано системний підхід до рішень та постановки пріоритетних наукових та технічних завдань створення парку енергозберігаючого теплообмінного та випарювального обладнання в хімічному виробництві з урахуванням органічного зв'язку нової техніки, передових технологій та їх конкурентоздатності.

2. Визначена концептуальна спільність отриманих теоретичних та інженерних рішень гідродинамики та теплообміну для сітчасто-поточних теплообмінників з розрахунками та конструюванням трубчастих, ламельних, стрічково-поточних пластинчастих, щілинних (з гладкими гріючими поверхнями), таких, що є окремими випадками отриманого загального рішення.

3. Побудована ідентифікована осередкова структура міжпластинного простору сітчато-поточного теплообмінника, встановлено, що вимушений перебіг рідини в міжпластинному сітчато-поточному просторі здійснюється у формі ряду поздовжніх конгруєнтних двозахідних гвинтових потоків, з взаємним підкрученням течій за

різноспрямованими проточними частинами осередків та зроблено математичний опис течій з використанням рішення теорії потенційних плоских та вихрових течій.

4. Знайдено, при використанні методу накладення відомих потенційних потоків (поступального плоско-паралельного, джерела та стоку), теоретичне рішення рівняння Лапласа, що визначає потенціал швидкостей, функцію струму, абсолютне значення вектора швидкості та його напрям в будь-якій точці швидкісного поля проточної частини осередку, що, у свою чергу, при рішенні зворотної задачі дає можливість сформулювати поле швидкостей під будь-яку, задану конструктором, форму осередку (що особливо важливе при варіаційному машинному проектуванні зручнообтічних енергозберігаючих теплопередаючих поверхонь). Подальший розвиток методу дозволяє проводити розрахунки тепловіддачі та гідроопору, що визначає теплотехнічну досконалість теплообмінників, створювати нові перспективні конструкції.

5. Розроблена методика рішення задач течій, що обтікають складні форми поверхонь теплообміну. До рішення задач повернутий математичний апарат функцій комплексного змінного, такого, що значно розширює можливості використання методу потенційних течій для будь-яких обтічних поверхонь.

6. Отримано функції впливу взаємного підкрочення течій в осередку на швидкість рідини у стінки, яка враховується залежністю Стокса-Гельмгольца, а індукційованої швидкості - залежністю Біо-Савара.

7. Розроблена математична модель тепловіддачі при випарюванні та нагріві у випарювальних апаратах багаторазового використання пари – в єдиному агрегаті, в яких розчин тече у вигляді гравітаційної плівки на кооксально розташованих кінцевих та вертикальних поверхнях теплообміну. Зроблена експериментальна перевірка отриманих теоретичних результатів, які мають загальне рішення для кінцевих та вертикальних поверхонь теплообміну.

8. Отримано вирази для обчислення теплообміну та втрат рушійного тиску в теплообмінних апаратах з політетрафторетилену (фторопласту), його сополімерів та поліолефінів, що мають довговічність в $5 \div 8$ разів перевищуючу довговічність традиційних металевих теплообмінних пристроїв.

9. Сформульовано й досліджено теоретичні рішення та конструкції трубчастих випарних апаратів з гриючими камерами, що мають тонкостінні трубні решітки, сумірні (за товщиною) із стінками труб, що дозволяє зменшити металоємність гриючих камер до $30 \div 50$ %.

10. Отримано й досліджено теоретичні рішення та конструкції енергозберігаючих випарних установок зануреного горіння - парогенераторів - з роздільним виведенням димових газів та сокової пари, що мають коефіцієнт повноти використання тепла - $95 \div 97$ %.

11. Отримано розрахунки, дані експериментальних випробувань та створено енергозберігаючий вид пластинчастих теплообмінних апаратів (з прямими та S-подібними гофрами), що дозволяє знизити питомі енерговитрати до 50 %.

12. Запропоновані науково обгрунтовані рекомендації щодо вибору нових видів корозійностійких сталей, сплавів та засобів зварювання, побудовані за результатами досліджень (що потребуються високими технологіями), які забезпечують значне зниження промислових експлуатаційних та ремонтних енерговитрат.

13. Результати досліджень дозволили створити патенто-захищені енергозберігаючі технічні рішення:

- конструкції трубчастих, пластинчастих та контактних теплообмінників, випарників інтенсивної дії, а також багатокорпусних випарювальних установок цільового призначення (що мають пріоритет Україні та Росії);
- нові конструкції теплообмінних апаратів із фторопласту та його сополімерів, засоби їх виготовлення та організація серійного промислового виробництва;
- нові методи інженерних розрахунків та конструкції енергозберігаючих кожухотрубчастих теплообмінників підвищеної ефективності з трубними решітками, товщини яких спільномірні з товщинами теплообмінних труб;
- метод розрахунку і нові конструкції підігрівачів та енергозберігаючих випарних апаратів-парогенераторів зануреного горіння;
- створення оптимальної системи вибору нових конструкційних висококорозійностійких сталей та сплавів багатоцільового галузевого застосування, регламентація їх зварювання, забезпечення якості та надійності.

14. В результаті виконаних в дисертаційній роботі досліджень вирішена важлива науково-практична і народно-господарська проблема енергозбереження в хімічній промисловості України. Створено нове покоління теплотехнічного устаткування призначене для апаратурного оформлення нових хімічних та нафтопереробних технологій. Результати дисертаційної роботи упроваджені на ряді підприємств нафтогазохімічного комплексу та машинобудівних підприємствах країни, зокрема Лісичанському ВАТ «Лінос», Кременчуцькому ВАТ «УКРТАТНАФТА», ВАТ «Титан» (м. Армянськ), ВАТ «Сумському НВО ім.М.В. Фрунзе», ВАТ «Завод Павлоградхіммаш» м. Павлоград, Дніпропетровської обл.), ВАТ «Снежнянськхіммаш» (м. Сніжне, Донецької обл.), ВАТ «УкрНДІхіммаш».

Основний зміст дисертації опублікований в працях:

1. Перцев Л.П. Расчет оптимального теплового и гидродинамического режимов работы выпарных аппаратов пленочного типа с многократным использованием тепла / Л.П. Перцев, С.Б. Лисиченко., Ю.Б. Данилов, В.В. Кравчук //Химическая промышленность. – Москва, 1990. – № 8. – С. 29 - 30.

Здобувачу належить розробка конструкції, проведення експериментальних досліджень та розробка математичної моделі.

2. Седлов А.С. Установка очистки сточных вод ТЭЦ в модульном исполнении с получением сухого остатка солей / А.С. Седлов, В.Д. Рожнатовский, Ю.Б. Данилов, П.С. Борозна, А.Ф. Прахи, Л.Д. Марунина, О.П. Провоторов, А.Н. Назаров, Г.К. Фрейзлев, Л.П. Перцев // Теплоэнергетика. – Москва: Энергоатомиздат.–1991.– № 5. – С. 26- 30.

Здобувачу належить розробка енергозберігаючої технології, тепловий розрахунок і апаратурне оформлення установок переробки продувок установки дистиляції.

3. Данилов Ю.Б. Термическая обработка промышленных стоков / Ю.Б. Данилов, А.С. Мачаев // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – № 22.– С. 148 – 151.

Здобувач описав існуючу технологію обробки стоків та виклав теоретичне обґрунтування застосування випарних установок для утилізації стоків.

4. Ульєв Л.М. Теплообмен и испарение жидкости при пленочном течении в конфузоре / Л.М. Ульєв, Ю.Б. Данилов // Теоретические основы химической технологии. – Москва: изд. Наука – 1999. – Т. 33, № 1. – С. 30 - 38.

Здобувачу належить розробка конструкції випарника, математичної моделі та перевірка відповідності з експериментальним даним.

5. Данилов Ю.Б. Коррозионные исследования сплавов фирмы «Крупн ВДМ» в производстве каустической соды / Ю.Б. Данилов, В.А. Качанов, Е.К. Гвоздикова, Т.Э. Шепель, В.Н. Хиль, Т.А. Балак, В.С. Горлова // Химическое и нефтяное машиностроение. – Москва. – 2001. - № 4. – С. 40 – 44.

Здобувач приймав участь у дослідженнях, провів аналіз наукової інформації щодо застосування сплаву.

6. Наконечный А. Особенности коррозионного разрушения сварных соединений Ni-Cr-Mo сплавов / А.Наконечный, Л. Червякова, Т. Старущенко, Т. Шепиль, Ю.Б. Данилов, В. Качанов // Фізикохімічна механіка матеріалів. Проблеми корозії та антикорозійного захисту матеріалів. – Львів. - 2002. –№ 3.- С. 124 – 128.

Здобувач приймав участь у дослідженнях, провів аналіз та узагальнення дослідних даних.

7. Павленко В.Ф. Конструкційні матеріали для обладнання з виробництва натрієвого лугу. / В.Ф. Павленко, Ю.Б. Данилов, В.А. Качанов В.А., Хиль В.М. // Хімічна промисловість України. – Київ. - 2002. - № 4 (51). – С. 21 – 28.

Здобувач брав участь в дослідженнях та видачі рекомендацій використання сплавів для розроблення устаткування одержання каустичної соди.

8. Ющенко К.А. Исследование коррозионного разрушения сварных соединений из никельхромомолибденовых сплавов / К.А. Ющенко, Т.М. Старущенко, А.А. Наконечный, Л.В. Червякова, Т.Е. Шепель, В.А. Качанов, Ю.Б. Данилов // Автоматическая сварка. – Киев. – 2003. - № 6. – С. 14 – 16.

Здобувач приймав участь у дослідженнях, провів аналіз та узагальнення результатів.

9. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Теплоэнергетика погружного горения в решении проблем теплоснабжения и экологии Украины / Л.П. Перцев, В.П. Шапоров, Ю.Б. Данилов, Н.Л. Морозова, О.А. Лопухина // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2004. - № 3. – С. 3 – 13.

Здобувачем викладені наукові та промислові обґрунтування розробки нового покоління устаткування заглибного горіння.

10. Качанов В.А. О коррозионном поведении высоколегированных сплавов нового поколения в агрессивных средах. Ч.1. Производство уксусной кислоты / Ю.Б. Данилов, Е.К. Гвоздикова, Т.Э. Шепиль, В.Н. Хиль, В.Н. Потапов, Т.А. Балак // Коррозия: материалы, защита. – Москва: РАН. – 2005. - № 11. – С. 20 – 27.

Здобувач приймав участь у дослідженнях, розробив методику та рекомендації щодо використання сплавів для розроблення устаткування одержання оцтової кислоти.

11. Данилов Ю.Б. Контактное теплообменное устройство из фторопласта для колонных аппаратов / Ю.Б. Данилов, А.Н. Сулима, В.Н. Коломиец, М.А. Хар-

ченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 11. – С. 59 – 64.

Здобувач розробив конструкцію контактної теплообмінної пристрою, обробив експериментальні данні.

12. Качанов В. Сравнительные исследования коррозионной стойкости высоколегированных хромо-никель-молибденовых и никель-молибденовых сплавов в производстве двуокиси титана / В. Качанов, Ю. Данилов, Е. Гвоздикова, В. Горлова, В. Хиль, Т. Балак // Коррозия: материалы, защита. – Москва: РАН. – 2005. – № 12. – С. 35-46.

Здобувач обґрунтував наукову інформацію, приймав участь у дослідженнях та видав рекомендації щодо застосування сплавів у виробництві титану.

13. Данилов Ю.Б. Вихревые течения в каналах сетчато-поточных пластинчатых теплообменников / Ю.Б. Данилов // Интегрированные технологии та энергосбережения. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 1. – С. 3 – 8.

14. Данилов Ю.Б. Течение несжимаемой жидкости в ячейке сетчато-поточных пластинчатых теплообменников, индуцированное вихревым полем./Ю.Б. Данилов. – // Интегрированные технологии та энергосбережения.– Харків: НТУ „ХПІ”. – 2006. – № 2. – С. 32 – 36.

15. Данилов Ю.Б. Новое и перспективное оборудование для химической промышленности / Ю.Б. Данилов // Химия и технология топлив и масел. – Москва. – 2006. – № 5. – С. 7 – 8.

16. Ющенко К. Опыт ремонта колонного оборудования нефтеперерабатывающих производств / К. Ющенко, Л. Чекотило, Ю. Каховский, А. Булат, Р. Морозова, Ю. Данилов, В. Качанов, А. Кабашний, С. Ивануна, Т. Шепель, Е. Гвоздикова, Ю. Козин // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Проблеми корозії та антикорозійного захисту матеріалів. – Львів. – 2006 р. – №3 - С. 487 – 494.

Здобувач провів дослідження якості зварювання двошарових сталей підвищеної твердості та розробив рекомендації щодо технології ремонту.

17. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Гидросопротивление течению несжимаемой жидкости в межпластинчатой полости сетчато-поточного пластинчатого теплообменника / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев, А.Е. Морозов // Интегрированные технологии та энергосбережения – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 3. – С. 36 – 42.

Здобувач розробив структури потоку та методику розрахунку гідроопіру осередку.

18. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Теплопередача несжимаемой вязкой жидкости при течении в межпластинной полости сетчато-поточного пластинчатого теплообменника / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Ю.Б.Данилов, Л.П. Перцев, А.Е. Морозов // Интегрированные технологии та энергосбережения. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 1. – С. 25 – 34.

Здобувачеві належить розробка математичну модель тепловіддачі в міжпластинової порожнині.

19. Данилов Ю.Б. Реактор отримання діетилового ефіру. Нові конструктивно-матеріальні розробки / Ю.Б. Данилов, А.М. Суліма, В.А. Качанов, В.М. Коломієць, О.К. Гвоздікова, Л.С. Молодцова, Н.Г. Ситник // Хімічна промисловість України. – Київ. – 2007. – № 3. – С. 7 – 10.

20. Качанов В. Коррозионно-электрохимическое поведение конструкционных материалов и их сварных соединений, выбор материального исполнения при конструировании оборудования для производства карбоновых кислот / В. Качанов, Ю. Данилов, Е. Гвоздикова, Т. Шепиль // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів. – 2007. – № 6 - С. 23 – 28.

Здобувач брав участь в дослідженнях, обробці наукової інформації, видачі рекомендацій.

21. Качанов В.А. Коррозия сварных соединений биметалла 16ГС+08Х13, изготовленных из образцов, вырезанных из колонны после эксплуатации / В.А. Качанов, Ю.Б. Данилов, Т.Э. Шепиль, Е.К. Гвоздикова, В.Ю. Козин, А.И. Кабашный, С.М. Ивануна, К.А. Ющенко, Л.В. Чекотило, А.В. Булат // Коррозия, материалы, защита. // Наука и технология. – Москва. – 2007. – № 1. – С. 495 – 501.

Здобувач брав участь в дослідженнях, обробці наукової інформації, видачі рекомендацій.

22. Данилов Ю.Б. Разработка технологий на реконструкцию и ремонт оборудования, эксплуатирующегося в агрессивных средах. Опыт исследования сталей и сплавов нового поколения / Ю.Б. Данилов, К.А. Ющенко // Хімічна промисловість України. – Київ. – 2007. – № 5. – С. 26 – 30.

Здобувачеві належить аналіз руйнування сплавів та розробка технології на реконструкцію устаткування.

23. Качанов В.А. Коррозионно-электрохимическое поведение конструкционных материалов и их сварных соединений в условиях эксплуатации оборудования при производстве смеси карбоновых кислот / В.А. Качанов, Ю.Б. Данилов, Е.К. Гвоздикова, Т.Э. Шепиль // Коррозия: материалы, защита. – Москва. – 2007. – № 12. – С. 16 – 26.

Здобувач розробив методики дослідження та провів зробив аналіз корозійної поведінки матеріалів та їх зварних з'єднань.

24. Данилов Ю.Б. Оптимизация технологического процесса отбели концентрированной азотной кислоты путем применения теплообменных аппаратов / Ю.Б. Данилов, В.Н. Коломиец, С.А. Ладченко // Вісник Національного технічного університету «ХП». Харків: – НТУ «ХП». – 2008. – № 10. – С. 68– 73.

Здобувач брав участь в розробці технології відбілки кислоти та конструкції теплообмінного апарата.

25. Данилов Ю.Б. Математические и экспериментальные исследования модели оросительного теплообменника из фторопластовых трубок / Ю.Б. Данилов, В.Н. Коломиец, С.А. Ладченко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – № 3. – С. 3 – 9.

Здобувач брав участь в розробці конструкції теплообмінного пристрою, обробці експериментальних даних та узагальненні наукової інформації.

26. А. с. 1256717 СССР. Способ концентрирования хлормagneвых растворов./ В.С. Фокин, Л.П. Перцев, Н.Е. Загорюлько, Ю.Б. Данилов., А.Н. Оскнер., І.І. Ковалишин, З.В. Варивода, А.Я. Обухов, Ю.П. Кузьмин, В.І. Савчук; - опубл. 07.12.89, Бюл. № 45.

Здобувачу належить розробка технології концентрації хлормagneвого розчину та її апаратного виконання.

27. А. с. 1815822 СССР, Выпарной аппарат многократного действия / Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев, В.С. Фокин, Е.М. Ковалев, Г.И. Соловьева; - опубл. 11.10.1992.

Здобувачу належить науково-технічна ідея багатоступінчатого випаровування в єдиному апараті.

28. А. с. 1827825 СССР. Выпарной аппарат многократного действия / Ю.Б. Данилов, В.С. Фокин, В.М. Гуторов, Л.П. Перцев; опубл. 13.10.1992.

Здобувач розробив конструкцію апарата та внутрішніх пристроїв.

29. А. с. 1813469 СССР. Выпарной аппарат со стекающей пленкой / Ю.Б. Данилов, А.И. Рубан, В.В. Кулинич; опубл. 07.05.93, Бюл. № 17.

Здобувач розробив конструкцію випарювання випарника та конденсатора вторинної пари в одній грюючій камері.

30. Пат. 44806 Российской Федерации на полезную модель. Пакет перекрестноточного теплообменника / Лебедев Ю.Н., Чекменев В.Г., Марголин Г.А., Данилов Ю.Б., Дроздов В.В.; опуб. 27.03.2005.

Здобувачу належить схема компонування пакету теплообмінника, участь в редагуванні формули патенту та опису.

31. Пат. 8531 на винахід. Перехреснопоточний теплообмінник/Данилов Ю.Б., Дроздов В.В., Дудник В.М.-№ а 2007 05583; заявл. 21.05.07; опубл. 20.08.02, Бюл. № 16.

Здобувачу належить основна ідея конструкції, також він взяв участь в складанні формули корисної моделі.

32. Пат. 76548 на винахід. Пластинчастий випарний апарат з багаторазовим використанням тепла/Данилов Ю.Б., Фокин В.С., Данилов Д.Ю.; опубл. 2006. Бюл. № 8.

Здобувачу належить науково-технічна ідея форми та компанування пластин.

33. Пат. 20903 на корисну модель. Установка для регенерации відпрацьованої серчаної кислоти / Данилов Ю.Б., Невшупа О.І., Дмитрієв В.Є., Калмиков В.В., Качанов В.А., Богучарова С.Е., Хіль В.М., Бобков Д.В., Стрільцов М.В.; опубл. 2007, Бюл. № 2.

Здобувачем розроблена технологічна схема концентрування та кристалізації, а також апаратурне оформлення процесу.

34. Анохін Г.О. Навчальний посібник за ред. Ткача Г.А., Мочаєва А.С. Устаткування хімічних виробництв / Г.О. Анохін, Ю.Б. Данилов, А.С. Мочаєв, А.М. Суліма, В.С. Фокин, М.А. Харченко, В.А. Цибульник. - Київ, 1993. – 232 с.

Здобувач написав розділ «Випарні апарати та багатокорпусні установки».

35. Фокин В.С. Кристаллизация солей при выпаривании водно-солевых растворов / В.С. Фокин, Ю.Б. Данилов, Н.Е. Загорулько // Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств: Всесоюзная науч.-тех. конф. ПАХТ-85, ХПИ им. В.И. Ленина, 1985 г.: тезисы докл., – Харьков, 1985.– С. 87 - 88.

Здобувачу належить розробка залежності визначення середньозваженого розміру кристалів солей.

36. Данилов Ю.Б. Испарение жидкости при пленочном течении в конфузоре / Ю.Б. Данилов, Л.М. Ульев, В.А. Коровка // Теплообмен: Росс. конф., 21-25 ноября, 1994 г.: тезисы доклада, –Москва, 1994. –С.57-62.

37. Качанов В.А. Исследование коррозионно-электрохимического поведения высоколегированных сплавов нового поколения в агрессивных средах. Сборник тезисов. Том 1, часть 2. / В.А. Качанов, Ю.Б. Данилов, Е.К. Гвоздикова, Т.Э Шепиль, В.Н. Хиль, В.Н. Потапов, Т.А. Балак // Производство диоксида титана: междунар. конф. Физико-химические основы XXI века. – Москва, – 2005. – С. 39 – 44.

Здобувач розробив методику дослідження корозійно-електрохімічної поведінки високолегованих сплавів нового покоління в агресивних середовищах.

38. Ющенко К.А. Возможности ремонту колонного оборудования нефтеперерабатывающих заводов с целью увеличения ресурса эксплуатации (проект 8.5а)/К.А. Ющенко, Л.В. Чекотило, Ю.М. Каховський, О.В. Булат, Р.І. Морозова, С.О. Супрун, Я.Б. Лебедевич, Г.Ф. Настенко, В.А. Пестов, Ю.Б. Данилов, В.А. Качанов, О.І. Кабашний, С.М. Ивануна, Т.Е. Шепиль // Збірник наукових статей, цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу та безпеки експлуатацій конструкцій, споруд та машин” Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – Київ. - 2006. – С. 501 – 5005.

Здобувач провів дослідження якості зварювання двошарових сталей підвищеної твердості та розробив рекомендації щодо технології ремонту.

39. Chekotilo L.V. Extension of service life of column equipment at oil refineries/ L.V. Chekotilo, Yи.B. Lebedevich, A.V. Zvyagintseva, Yи.B. Danilov, V.A. Kachanov, A.I. Kabashny, S.M. Ivanuna, T.E. Shepel, E.K. Gvozdikova, Yи.V. Kozin //International Association Welding# 10.2006. – Kiev. – S. 24 – 29.

Здобувач брав участь в дослідженнях та розробив рекомендації щодо продовження ресурсу експлуатування устаткування.

40. Данилов Ю.Б. Современное теплообменное оборудование для химических отраслей / Ю.Б. Данилов // Труды IX международной научно-практической конференции: Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты. – Кемерово, – 2006. – С. 17 – 22.

41. Kachanov V.A. The Corrosion of Welded Joints of 16GS+08Kh13 Bimetal, Made of the Specimens Cut out from a Column after the Long-Term Operation./ Yи.B. Danilov, T.E. Shepel, E.K. Gvozdikova, Yи.V. Kozin, A.I. Kabashny, S.M. Ivanuna, K.A. Yushenko, L.V. Chekotilo and A.V. Bulat.// Protection of metals, Volume 43, Number 7, November–December, – 2007. – С. 343– 637.

Здобувач розробив методики дослідження та провів аналіз корозійної поведінки матеріалів та їх зварних з'єднань.

АНОТАЦІЯ

Данилов Ю.Б. Науково-практичні основи створення енергосберігаючого теплообмінного та випарювального обладнання хімічних виробництв . - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.- Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” , Міністерство освіти та науки України; Харків, 2009 р.

Дисертація присвячена розробці наукових основ і методів розрахунку гідродинамічних та теплообмінних процесів для створення енергосберігаючого теплообмін-

ного та випарювального обладнання хімічних виробництв. Проведено аналіз світового науково-технічного рівня теплообмінного і випарювального обладнання, який дозволив розробити пріоритетні напрямки розвитку та технічного переозброєння галузі, визначити мету та поставити завдання досліджень, а також шляхи їх реалізації.

У роботі побудована ідентифікована осередкова структура міжпластинного простору сітчато-поточного теплообмінника, розроблена методика визначення течій, що обтікають складні форми поверхонь теплообмінника; отримана функція впливу взаємного підкручення течій в осередку на швидкість рідини у стінки, яка враховується залежністю Стокса-Гельмгольца, а індукованої швидкості - залежністю Біо-Савара.

Розроблена математична модель тепловіддачі при нагріві і випарюванні у випарювальних апаратах багаторазового використання пари – в єдиному агрегаті, де розчин тече у вигляді гравітаційної плівки на коаксіально розташованих кінцевих та плоских вертикальних поверхнях теплообмінника.

Отримані вирази для обчислення теплообміну та втрат рушійного тиску в теплообмінних апаратах з політетрафторетилену (фторопласту), його сополімерів та поліолефінів.

Отримано й досліджено теоретичні рішення та сформовані на їх основі конструкції трубчастих випарних апаратів з гріючими камерами, що мають тонкостінні трубні решітки, сумірні (за товщиною) зі стінками труб, що дозволяє зменшити металоемність гріючих камер до 30÷50 %.

Отримано й досліджено теоретичні рішення та конструкції енергозберігаючих випарних установок зануреного горіння - парогенераторів - з роздільним виведенням димових газів та сокової пари, що мають коефіцієнт повноти використання тепла - 95 ÷ 97 %.

Ключові слова: випарювання, теплообмін, гідродинаміка, випарник, теплообмінник, математичні моделі, ресурсозбереження, енергозбереження, ефективність.

Данилов Ю.Б. Научно-практические основы создания энергосберегающего теплообменного и выпарного оборудования химических производств. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Кафедра химической техники и промышленной экологии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Министерства науки и образования Украины; Харьков, 2009 г.

Диссертация посвящена разработке научных основ создания теории методов расчета гидродинамических и теплообменных процессов, прочностных и коррозионных исследований теплообменного и выпарного оборудования химических производств. На базе современных научных представлений и передового промышленного опыта проведен анализ научно-технического уровня оборудования и производств, определены приоритетные направления исследований и новых разработок теплообменного и выпарного оборудования; выработан системный подход на основе классификации изделий, предназначенных для обслуживания параметрических полей потребности отрасли, и произведена структуризация компонентов конструкторско-

технологических модулей (КТМ) теплохимического оборудования и установок, оптимально сбалансированных, по целевому теплохимическому назначению, что позволило построить концепцию и общую методологию проведения тепловых, гидродинамических, прочностных, деформационных, коррозионных и экологических исследований и создать конкурентоспособную на мировом рынке теплообменную и выпарную химическую аппаратуру.

Обработанная новая научная информация позволила:

- разработать теорию расчета и создать патентоспособный высокоэкономичный пленочный выпарной аппарат, с многократным использованием тепла греющего пара (в одном агрегате), теплообменные элементы которого выполнены в виде вертикальных полуцилиндров, усеченных конусов и плоских вертикальных поверхностей по которым гравитационно стекает выпариваемая пленка;

- установить концептуальную общность теоретических и инженерных решений гидродинамики и теплообмена для трубчатых, щелевых, сотовых, пластинчатых, панельных теплообменников на основе обобщенной геометрической модели сетчато-поточного пластинчатого теплообменника с переменными линейными и угловыми параметрами гофрировки пластин;

- разработать методы математического моделирования наиболее эффективных видов теплообменной и выпарной аппаратуры (изготовленных из металлопроката и неметаллических материалов), создать алгоритмы и пакеты программ для оптимального машинного проектирования; использовать метод наложения функций потенциальных течений (плоско-параллельного, источника и стока), для которых функции скоростей и линий тока теоретически известны, с целью использования точного решения уравнения Лапласа, позволяющего построить кинематические схемы структур потоков и распределение скоростей по проточным частям каналов, а при решении обратной задачи дает возможность сформировать поля скоростей при обтекании любой, заданной конструктором, формы теплопередающих поверхностей (заданных в качестве нулевых линий тока);

- создать ресурсо-энергосберегающие выпарные установки погружного горения – парогенераторы – с отдельными отводами охлажденных дымовых газов и сокового пара, обеспечивающие использование до 97 % теплотворной способности топлив и снижение вредных газовых выбросов до экологически допустимых норм;

- установить закономерности теплообмена и гидросопротивлений в новых видах созданных энергосберегающих пластинчатых теплообменников с прямолинейными и криволинейными гофрами; создать систему рекомендаций по разработке и выбору высококоррозионностойких, эррозионностойких сталей и сплавов, экономических методов их технологической обработки и сварки, обеспечивающих снижение энергозатрат при изготовлении, эксплуатации и ремонте;

- создать по результатам исследований и разработок государственные стандарты Украины на параметры, типы, конструкции и размеры теплообменных и выпарных аппаратов, а также нормативная расчетная документация гармонизированная с Международными Стандартами (ISO) и Европейскими Нормами (EN).

Результаты диссертационной работы использованы и внедрены на промышленных предприятиях, НИИ отрасли и используются при обучении инженерных и

научных кадров, а также обучении студентов на кафедре химическая техника и промышленная экология НТУ «ХПИ» в ОАО «УкрНИИхиммаш».

Ключевые слова: выпаривание, теплообмен, гидродинамика, выпарной аппарат, теплообменник, математические модели, ресурсосбережение, энергосбережение, эффективность.

Danilov, Yuri B. "Scientific fundamentals of energy seaving heat exchanging equipment for the oil, gas and chemical industries ". Manuscript.

A dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.17.08 - "Processes and Equipment for Chemical Technologies", National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute".

The Ministry of Education and Science of Ukraine. Kharkiv, 2009.

The dissertation is devoted to solving the problem of saving energy in the oil, gas and chemical processing industry. In the process of teoretical investigation, mathematical models of convective heat exchange though impermeable walls were built. This project was based upon the hydrodynamic principlies of heat exchange with respect to basic types of heat exchangers and evaporators.

The application of method of the overlaying the tree given potential streams (the advancing slightly parallel current, the source and the sewer current) allowed to use the theoretical solution of the eguation of LaPlace with defines the potential of velocities the current sunection, the absolute meaning of the velocity vector and its direction at any point of the velocity sield.

While solving an iverted task it is possibl to form a velociti sield for any cell form defined by a designer. This is of special importance in computer-aided design of stream-lined power saving heat exchanging interfaces.

Some recommendations are given as to choosing corrosion-proof material, welding technology and equipment manufacture wich drastically increase the competitiveness of the product. The results obtained are applied at a number of engineering enterprises and in the oil and gas processing industry of Ukraine, in scientific and research institutes, and has also been considered by Chairman of "Chemical Equipment and Industrial Ecology" department of the National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute".

Key words: evaporation, heat exchanger, evaporator, heat regims, standart industrial tests, energy saving, power saving, dip burning, ecology.

Підписано до друку 12.03.2009 р. Формат 60x90/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Умовн. Друк.арк.0,9.
Гарнитура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зак. № 3258

Надруковано у ТОВ „Перша експериментальна друкарня”.
Свідоцтво № 31634842 від 19.09.2001 р.
61093, м. Харків, вул Полтавський шлях, 144, кв. 64
