

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Нечипоренко Дмитро Ігорович

УДК 66.048.54

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ
ВИПАРОВУВАННІ ЛУЖНИХ ТА ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ РОЗЧИНІВ В
ПЛІВКОВОМУ АПАРАТІ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” на кафедрі хімічної техніки та промислової екології

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Фокін Віталій Сергійович
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
м. Харків, професор кафедри
теплотехніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Перцев Леонид Петрович
Український науково-дослідний
інститут хімічного машинобудування,
ВАТ “УкрНДІХімаш”, м. Харків,
науковий консультант

кандидат технічних наук, доцент
Панасенко Володимир Олексійович
Державний науково дослідний і
проектний інститут основної хімії
“НІОХІМ”, м. Харків, головний
інженер проекту

Провідна установа:

Сумський державний університет,
Міністерство освіти і науки України,
м. Суми.

Захист відбудеться 19.04.2007 року о 14 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 ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий 19.03. 2007 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Тимченко В.К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У цей час в усьому світі й зокрема в Україні надзвичайно гостро стоять питання зниження енерговитрат і обмеження шкідливих викидів у навколишнє середовище практично у всіх галузях виробництва. Зниження енерговитрат і зменшення шкідливих викидів може бути досягнуто тільки розробкою й впровадженням у виробництво нових раціональних теплових схем, тепловикористовуючих апаратів і конструкцій які передбачали б такий розподіл теплоносіїв стосовно до технологічного процесу, при якому забезпечувалися б задані технологічним регламентом параметри (температура, концентрація, тиск, розрідження й т.д.) при мінімальній витраті теплової й електричної енергії.

Найважливішою ділянкою теплової схеми будь-якого виробництва де виникає необхідність у концентруванні розчинів, є випарна установка (ВУ), призначена для згущення розчину до концентрованого сиропу із заданим відсотком змісту сухих речовин. Процес випарювання знайшов широке застосування в хімічній і харчовий галузях, а також при очищенні стічних вод від деяких токсикантів. При цьому досить часто доводиться зіштовхуватися з необхідністю випарювання термолабільних (термонестійких) розчинів – розчинів які при температурах випарювання втрачають свої властивості.

Для складання раціональних теплових схем необхідно запропонувати нові математичні моделі які дозволяють знизити питомі енергетичні витрати при апаратному оформленні та враховувати новітні досягнення у теплотехнічних розрахунках.

Таким чином, необхідність вирішення цих завдань послужила підставою для постановки й проведення комплексного теоретичного й експериментального дослідження роботи ВУ для випарювання розчинів хімічних виробництв, зокрема термонестійких розчинів, із числом корпусів від 2-х до 10-и, різних конструкцій і при різних вихідних даних.

Актуальність вибраного напрямку досліджень обумовлена перспективними та необхідними для України завданнями – енерго та ресурсо-заощадженням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ „ХПІ” в процесі проведення досліджень у рамках госпдоговірної теми “Розробка концепції та нових технологій рекультивациі полігонів і переробки промислових і побутових відходів” з підприємством ТОВ “Укрпромекологія” (м. Харків, 2004 р.) і договору про науково-творчу співдружність з ВАТ Чернівцілегмаш (м. Чернівці, 2005), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення процесу випарювання лужних і термолабільних (термонестійких) розчинів спрямоване на зниження енерговитрат: розробка математичної моделі процесу випарювання, створення програмного комплексу для автоматизованого розрахунку багатокорпусних випарних установок (БКВУ), розробка нової конструкції камери, що гріє, випарного апарату (ВА) й дослідження закономірностей

процесу кипіння двофазного потоку розчину в пластинчастій камері що гріє з падаючою плівкою.

Відповідно до цієї мети сформульовані й вирішені такі задачі:

1. Проаналізована технічна література по випарюванню розчинів хімічних підприємств та обрані напрямки дослідження.

2. Розроблена фізична і математична модель процесу випарювання в багатокорпусної випарної установки та створено програмний комплекс “МВУ-ФНП”, що дозволяє автоматизувати теплові розрахунки БКВУ.

3. За допомогою програмного комплексу “МВУ-ФНП” експериментально встановлені особливості роботи БКВУ – вплив розподілу підживлення розчину, температури та конструкцій ВА на поверхню теплообміну та інші технологічні параметри.

4. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблена перспективна конструкція поверхні теплообміну – розбірна ширококанальна, прямоточна пластинчаста камера, що гріє з висхідно-падаючим двофазним потоком розчину.

5. На підставі дослідження закономірностей процесу кипіння розчинів у ВА з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою було отримано нове рівняння для розрахунку процесу теплообміну.

Об'єкт дослідження – процес кипіння розчинів при випарюванні в багатокорпусних випарних установках.

Предмет дослідження – теплопередача в процесі кипіння лужних і термолабільних (термонестійких) розчинів у ВА з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє, з висхідно-падаючим потоком.

Методи дослідження – при теоретичних дослідженнях процесу кипіння розчинів в БКВУ був використаний метод математичного моделювання на основі теорії теплопереносу за допомогою ПЕОМ. При лабораторних дослідженнях – методи з використанням сучасних методик обробки експериментальних даних та відповідних програмних пакетів, що реалізують методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблено математичну модель процесу випарювання розчинів у прямоточних БКВУ, яка дозволяє оптимізувати поверхню нагріву, витрати пари, що гріє, екстра пари та інші технологічні параметри в залежності від фізико-хімічних властивостей розчину.

2. Вперше для теплових і конструктивних розрахунків процесу випарювання розчинів у БКВУ розроблено повністю автоматизований програмний комплекс “МВУ-ФНП”.

3. Створено перспективну матеріало-заощаджуючу конструкцію поверхні нагріву ВА – розбірна ширококанальна пластинчаста камера, що гріє.

4. На підставі дослідження процесу кипіння двофазного потоку розчину в малому об'ємі отримано нове рівняння для розрахунку теплопередачі при кипінні розчинів у падаючій плівці, що дає можливість підвищити точність при теплових розрахунках.

Практичне значення одержаних результатів.

Для виробничого використання результатів досліджень було:

1. Розроблено, методику та програмний комплекс “МВУ-ФНП” для автоматизованих розрахунків БКВУ, які прийняти до використання при розрахунках й проектуванні БКВУ в Державному науково-дослідному й проектному інституті основної хімії /НІОХІМ/, м. Харків.
2. Спроектовано та випробувано конструкцію розбірної ширококанальної пластинчастої камери, що гріє, та методика її розрахунку, яка застосовується в процесі розрахунків і проектування випарного устаткування на ВАТ “УКРНДІХІММАШ”, м. Харків.
3. Проведені дослідно-промислові випробування ВА з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє для очистки стічних вод на ПП “КЕДР”, м. Чернівці.
4. Отримані рівняння для розрахунку коефіцієнта теплопередачі, які можуть бути використані при проектуванні випарного обладнання хімічних підприємств.

Особистий внесок здобувача. Особисто здобувач розробив математичну модель випаровування розчинів у БКВУ, реалізував її в програмний комплекс “МВУ-ФНП”, спроектував лабораторну установку, виконав експериментальні дослідження процесу кипіння розчинів у розбірній ширококанальної пластинчастої камери, що гріє, обробив результати цих випробувань. а також брав участь в розробці рекомендацій із проектування БКВУ з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє.

Апробація роботи. Загальні положення і матеріали дисертації доповідались та обговорювались на: X Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”. (м. Харків, 2002 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих учених. “Екологія. Людина. Суспільство.” (м. Київ, 2003 г.); III Міжнародній конференції “Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки.” (м. Чернівці, 2005 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”. (м. Харків, 2005 р.); науково-технічних семінарах викладачів, співробітників, аспірантів, студентів на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ“ХП” (2000-2006 р.р.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 6 друкованих працях, з яких 5 – у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 152 сторінки, з яких 20 ілюстрацій по тексту, 10 таблиць по тексту, 3 додатки на 21 сторінках, 102 найменувань використаних літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* розглянуто основні напрямки зниження енерговитрат під час процесу випарювання лужних і термолабільних (термонестійких) розчинів

хімічних виробництв. Зниження енерговитрат і зменшення шкідливих викидів може бути досягнуто тільки розробкою й впровадженням у виробництво нових методик розрахунків раціональних теплових схем, конструкцій тепловикористовуючих апаратів які передбачали б проведення процесу випарювання при мінімальній витраті теплової й електричної енергії.

У *першому* розділі наведено аналітичний огляд літератури з методів випарювання лужних та термолабільних розчинів і конструкцій випарювальних апаратів.

Процес випарювання розчинів у БКВУ знайшов широке застосування практично у всіх галузях промисловості, але дотепер теплотехнічні розрахунки БКВУ залишаються досить трудомісткими. Був зроблений аналіз основних конструкцій випарювальних апаратів. У літературних джерелах не було виявлено достатньо відомостей щодо автоматизації розрахунків БКВУ, в яких би враховувались основні конструкції ВА, що значно ускладнює розрахунки та проектування нових, а також реконструкцію діючих випарювальних станцій. Також не знайдено достатньо відомостей для теплового розрахунку тепловикористовуючого устаткування в якому процес кипіння розчину відбувається в малому об'ємі тонкої плівці двофазного потоку.

Тому у відповідності з результатами огляду літератури були сформульовані задачі дослідження, що складаються з наступних напрямків:

- аналіз всіх переваг та недоліків існуючих конструкцій ВА й факторів які впливають на енергозбереження при випарюванні;
- розробка математичної моделі процесу випарювання розчинів в БКВУ;
- створення програмного комплексу який дозволив би проводити дослідження процесу випарювання та його теплотехнічні розрахунки;
- дослідження процесу кипіння розчинів в малому об'ємі тонкої плівці двофазного потоку.

Другий розділ присвячений створенню математичної моделі процесу випарювання розчинів в БКВУ на хімічних підприємствах та підприємствах харчової промисловості.

Математичне моделювання роботи БКВУ було розроблено для наступних цілей:

- дослідження й розробки нових, більш досконалих теплових схем і нового обладнання випарних станцій (ВС);
- визначення можливості застосування серійно випарних установок, що випускаються, для конкретних умов виробництва;
- оптимального проектування БКВУ.

Математичне моделювання теплових процесів у БКВУ повинне прийти на зміну існуючим методам розрахунку ВС й іншого тепловикористовуючого устаткування, що звичайно застосовуються при теплових розрахунках і проектуванні.

Така заміна обумовлена насамперед тим, що застосовувані раніше методи ручного розрахунку багатоступінчастих ВУ, незважаючи на їхнє багаторазове поліпшення, відрізняються великою трудомісткістю й порівняно невисокою

точністю. Останнє викликано тим, що розрахунок ведеться роздільно для складових частин комплексу, а також без обліку цілого ряду факторів, що перетерплюють зміну при переході від одного варіанта ВУ до іншого й при зміні умов виробництва.

Застосування ПЕОМ для автоматизації існуючих методів розрахунку ВС різко зменшує їх трудомісткість, але не дає в достатній кількості тієї інформації, що потрібна для правильного вибору теплової схеми комплексу і його основних конструктивних і режимних параметрів. Тому при переході від ручного до машинного розрахунку БКВУ заслуговувало на увагу корінне вдосконалення існуючих методів розрахунків, зв'язане насамперед з:

- математичним описом комплексу в цілому з урахуванням внутрішніх зв'язків між параметрами окремих ділянок комплексу;
- переходом до різноманітного розрахунку ВУ при умовах роботи, які змінюються;
- додатковим включенням у розрахунок комплексу залежностей, що раніше не враховувалися, між параметрами й показниками режиму роботи ВУ;
- аналізом і вибором того або іншого варіанта ВУ по окремим критеріям.

Відповідно до цього необхідно було здійснити перехід від розрахунку ВС до математичного моделювання БКВУ, що дозволило б максимально наблизитися до реальних умов майбутньої роботи ВУ й вибрати з безлічі можливих варіантів той, котрий є оптимальним (за певним критерієм). При розробці математичного моделювання БКВУ, спрямованого на досягнення зазначених цілей, були вирішені наступні завдання:

- обрана методика складання математичного опису БКВУ з обліком викладених параметричних зв'язків ділянок і зміни умов виробництва;
- обраний сучасний спосіб алгоритмізації розрахунку ВУ на ЕОМ, що дозволяє проводити різноманітне (по схемах, параметрах і конструкціях) моделювання комплексу без зміни його математичного опису й машинної програми.

Підведення тепла до розчину який випарюється, відбувається в камері, що гріє, що представляє собою звичайний рекуперативний теплообмінник, тому математичні моделі переносу тепла й кількості руху у випарних апаратах будуть такими ж, як і для звичайних поверхневих теплообмінників.

Так як розчин у камері, що гріє, підігрівається насиченою паровою, що означає сталість температури середовища, що гріє $t_{г.п.}$, модель переносу тепла у випарному апараті описується рівнянням

$$Q = k\Delta t_{п}F, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м² К; $\Delta t_{п}$ – корисна різниця температур або температурний напір: $\Delta t_{п} = t_{г.п.} - t_{кип}$; F – поверхня нагріву, м².

Залежно від конструктивних особливостей апарата процес кипіння розчину може відбуватися як у трубному пучку, так і в пластинчатих каналах, тому відзначена обставина відбивається на способі визначення коефіцієнта теплопередачі в камері, що гріє.

В основу математичного опису I-го корпусу БКВУ покладені рівняння теплового й матеріального балансів і рівняння теплопередачі.

У *третьому* розділі наведено алгоритм автоматизованої програми для наукових досліджень і практичних розрахунків процесу випарювання в БКВУ – “МВУ-ФНП”.

Для розробки автоматизованої системи розрахунку роботи БКВУ, необхідно було створити програмне забезпечення. А для реалізації програмного забезпечення автоматизованої системи необхідно вибрати зручний для користувача віконно-діалоговий інтерфейс і сучасні засоби моделювання: чисельні методи рішення випарних установок, функції відгуку, план проведення факторного експерименту, спосіб знаходження цільової функції.

Тому для розрахунку БКВУ був створений програмний комплекс “МВУ-ФНП”. Він реалізований мовою Visual Pascal у середовищі Delphi 5.5b і може бути використаний на будь-яких IBM сумісних поліномів в операційних середовищах Windows 9x. В основу розробки алгоритму програмного комплексу була закладена схема прямої багатокорпусної випарювальної установки яка представлена на рис. 1.

Програмний комплекс “МВУ-ФНП” дозволяє виконувати теплотехнологічні розрахунки з метою встановлення температурних режимів БКВУ, коефіцієнтів тепловіддачі й теплопередачі, а також розподілу матеріальних і теплових потоків між корпусами установки, дає можливість виконувати розрахунки процесів випарювання, що протікають у випарних апаратах різних конструкцій, при різноманітних схемах підігріву розчину, підживлення й типів розчину.

Розрахунок повністю автоматизований, що дозволяє дійсно скоротити час для його проведення, який практично зводиться до внесення вихідних даних у двох віконно-діалогових інтерфейсах програмного комплексу “МВУ-ФНП”.

На рис. 2 – 3 представлені віконно-діалогові інтерфейси програмного комплексу “МВУ-ФНП”.

За допомогою програмного комплексу “МВУ-ФНП” було проведено дослідження впливу температури пари, що гріє, на величину поверхні теплообміну при випарюванні модельного розчину при інших рівних умовах для чотирикорпусної і п'ятикорпусної ВУ.

Для чотирикорпусної ВУ (рис. 4) видно, що підвищення температури пари, що гріє, на 15 °С приводить до зменшення необхідної поверхні нагрівання в середньому по всіх корпусах майже на 800 м², тобто більш ніж на 70 %.

Для п'ятикорпусної ВУ (рис. 5) видно, що підвищення температури пари, що гріє, на 15 °С приводить до зменшення необхідної поверхні нагрівання в середньому по всіх корпусах більш ніж на 800 м², тобто майже на 80 %.

За допомогою програмного комплексу “МВУ-ФНП” також було проведено 144 чисельних експериментів й вивчений вплив паралельного підживлення на ефективність випарювання електролітичних лугів у БКВУ.

Живильний розчин, що подається на перший корпус, відповідав $f_1=(50, 60, 70 \text{ і } 80) \%$. Для кожного підживлення було розглянуто по дев'яти варіантів при природній і штучній циркуляції зі зміною послідовності подачі конденсату й екстрапару в другий і третій підігрівники з першого корпусу.

Установлено, що залежність впливу зміни процентного відношення живильного розчину по корпусах БКВУ на витрату пари, що гріє, і площа поверхні теплообміну при природній і штучній циркуляції має наступний характер.

При схемі підігріву розчину в другому підігрівнику – конденсатом пари, що гріє, першого корпусу, а в третьому екстрапаром першого корпусу, площі поверхонь теплообміну БКВУ більше, ніж у випадку підігріву розчину в порядку зворотному вищевказаному, при природній і штучній циркуляції розчину.

Таким чином, у процесі аналізу залишаються два варіанти, їхні графіки наведені на рис. 6, відповідно із природною й штучною циркуляцією розчину, при одній схемі підігріву розчину. Коли другий підігрівник обігривається конденсатом пари, що гріє, першого корпусу, а третій – екстрапаром.

Вони відповідають наступному розподілу живильного розчину по корпусах БКВУ: перший $f_1=80 \%$, другий $f_2=20 \%$, третій $f_3=0 \%$, четвертий $f_4=0 \%$.

Далі був проведений аналіз витрати пари, що гріє, й обрані варіанти із природною й штучною циркуляцією, (рис. 7) при наступному розподілі живильного розчину по корпусах МВУ: перший $f_1=50 \%$, другий $f_2=35 \%$, третій $f_3=15 \%$, четвертий $f_4=0 \%$.

Проведений аналіз чисельного експерименту дозволив зробити наступні висновки:

- Підвищення температури пари, що гріє, приводить до значного зниження поверхні нагрівання камери, що гріє, ВА. Однак підвищення температури у свою чергу впливає на властивості термонестійких розчинів. Тому необхідно вибрати такі конструкції камер, що гріють, у яких час знаходження термонестійких розчинів зводився б до мінімуму.

- При подачі живильного розчину на перший корпус БКВУ $f_1=(50, 60, 70, 80) \%$, ознака відповідній схемі підігріву розчину, коли другий підігрівник обігривається конденсатом пари, що гріє, першого корпусу, а третій - екстрапаром першого корпусу, виключається, тому що спостерігається ріст площі поверхні теплообміну.

- Із всіх розглянутих варіантів кращий варіант зі примусовою циркуляцією, тому що в цьому випадку площа поверхні теплообміну зменшується на 50 % (розподіл підживлення по корпусах $f_i=(20-0-0) \%$, але збільшуються енерговитрати на додаткове силове встаткування і його експлуатацію.

- Площі при природній циркуляції й розподілі підживлення по корпусах $f_i=(35-15-0) \%$ зростають на 17 %, у порівнянні з підживленням $f_1=(60; 70 \text{ і } 80) \%$, а при штучній на 11 %.

• Витрата пари, що гріє, при природній і штучній циркуляції й розподілі $f_i=(35-15-0) \%$ менше на 9% , ніж при підживленні $f_1=(60; 70 \text{ і } 80) \%$.

Четвертий розділ присвячено вивченню процесу кипіння плівці розчину в малих об'ємах на експериментальній установці.

Найбільш ефективним і широко розповсюдженим методом концентрування різних розчинів є їхнє випарювання в стікаючій плівці трубчастих або пластинчастих випарних апаратах. Кипіння розчину в цих апаратах здійснюється в тонкій стікаючій по поверхні нагрівання плівці.

Для широкого впровадження цих апаратів у виробництво необхідна розроблена на підставі теоретичних і експериментальних досліджень методика їхнього розрахунку.

Питанню теоретичного дослідження процесу кипіння в тонкій плівці, що має товщину, рівну $2\text{ч}8$ товщинам прикордонного шару, приділялася недостатня увага. В основному вивчалися процеси кипіння плівки розчину, що рухається, в трубчастих апаратах. У зв'язку із чим у цей час відсутня надійна методика розрахунку теплообміну у випарних апаратах пластинчастого типу зі стікаючою плівкою.

Наявний розрахунковий нормативний матеріал для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при кипінні розчину в трубчастих апаратах рекомендує рівняння

$$\alpha = 0,021 \text{Re}^{0,21} \text{Pr}^{0,43} \lambda \left(\frac{g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

якщо $\text{Re} \leq 25000$.

Рівняння (2) не враховує вплив на інтенсивність теплообміну теплового навантаження (корисної різниці температур), що й дає завищене значення коефіцієнта тепловіддачі до 200% .

При розробці існуючих методів розрахунку так само не враховувався вплив таких факторів, як:

- імовірність зародження парових пухирців у центрах паротворення на поверхні нагрівання;
- швидкість росту парових пухирців (швидкість паротворення й частота відриву);
- рух парових пухирців, що відірвалися від поверхні нагрівання, у плівці.

Як відомо, кипіння – це безперервне утворення з розчинника парової фази у вигляді безлічі окремих парових пухирців.

Однією з умов випару розчинника з розчину при кипінні є перегрів розчину до температури насичення при тиску поза плівкою, тобто якщо система перебуває в стані статичної рівноваги.

Відповідно до закону зростання ентропії ймовірність зародження парового пухирця на поверхні нагрівання може бути описана вираженням $e^{a(s_1-s_2)}$, в експоненті якого стоїть зміна ентропії при безперервному переході системи зі стану з більшою ентропією s_1 у стан з меншою ентропією s_2 , що відповідає рівновазі. Зміна ентропії визначається термодинамічною постійною $\mathcal{G}_{\text{тер}}$,

величина якої залежить від тиску, при якому проводиться процес випарювання й типу розчину. З рівнянь теплового балансу й Клайперона-Клаузиуса було знайдено

$$\mathfrak{Q}_{\text{тер}} = \frac{r \cdot \rho''}{c \cdot \rho}, \quad (3)$$

де r – схована теплота паротворення при рівноважному стані системи, Дж/кг; ρ'' , c – відповідно щільності пари при рівноважному стані системи й розчину, кг/м³; c – теплоємність розчину, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Таким чином, імовірність зародження парового пухирця носить експонентний характер і є функцією $e^{a\mathfrak{Q}_{\text{тер}}}$, де a безрозмірний ступінь.

Процес випару розчинника з розчину здійснюється в наступній послідовності.

Спочатку паровий пухирець утвориться в центрі паротворення, потім росте в об'ємі й при досягненні критичного розміру відривається від поверхні нагрівання й спливає у плівці яка рухається уздовж її, захоплюючи за собою деяку кількість розчину із пристінної зони (прикордонний шар) до верхньої поверхні плівки.

Простір, що звільнився, у центрі паротворення заповнюється розчином і при досягненні температури, що перевищує температуру насичення на величину термодинамічної постійної $\mathfrak{Q}_{\text{тер}}$ (ентропія s_1) починається зародження нового пухирця. У процесі спливання парового пухирця з навколишнього його розчину випаровується розчинник і він росте. Від зовнішньої поверхні плівки паровий пухирець відривається в паровий простір з температурою рівноваги (ентропія s_2).

З вищевикладеного видно, що інтенсивність теплообміну при кипінні залежить від швидкості паротворення на поверхні нагрівання (частота зародження й відриву парового пухирця) і швидкості спливання пухирця (турбулізація плівки розчину).

Швидкість паротворення визначається питомим тепловим потоком q , переданим від поверхні нагрівання до киплячого розчину й термодинамічними характеристиками пари, що утворюється (r , ρ''), тобто

$$\omega = \frac{q}{r \cdot \rho'' f_{\text{к}}}. \quad (4)$$

Одним з факторів, що впливають на інтенсивність тепловіддачі при кипінні в плівці, є швидкість спливання парового пухирця. По-перше, паровий пухирець що спливає турбулізує плівку, а по-друге, швидкість видалення парового пухирця із плівки в парову зону впливає на частоту відриву парового пухирця від поверхні нагрівання.

На формування плівки парового пухирця й швидкість його спливання впливають сили поверхневого натягу системи “пара-рідина”.

Від величини сили поверхневого натягу залежить: товщина плівки та режим випару й спливання парового пухирця.

Процес кипіння двофазного потоку розчину описується системою диференціальних рівнянь:

1) рівняння енергії

$$\begin{aligned} & \beta' \rho' c' \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}' \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}' \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta'' \rho'' c'' \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}'' \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}'' \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{(r'' \rho'')}{\tau^2} = \\ & = (\beta' \lambda' + \beta'' \lambda'') \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

2) рівняння руху двофазного потоку з перемінним складом фаз

$$\begin{aligned} & g \rho' - 2\mu \left[2 \frac{\left(\frac{\partial^2 \bar{\omega}'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\omega}'}{\partial y^2} \right)}{d_{\text{эКВ}}} \right] + \sigma \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = \beta' \rho' \left(\frac{\partial \bar{\omega}'}{\partial \tau} + \bar{\omega}' \frac{\partial \bar{\omega}'}{\partial x} + \bar{\omega}' \frac{\partial \bar{\omega}'}{\partial y} \right) + \\ & + \beta'' \rho'' \left(\frac{\partial \bar{\omega}''}{\partial \tau} + \bar{\omega}'' \frac{\partial \bar{\omega}''}{\partial x} + \bar{\omega}'' \frac{\partial \bar{\omega}''}{\partial y} \right) + \\ & + (\bar{\omega}'' - \bar{\omega}') \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\beta'' \rho') + \frac{\partial}{\partial x} (\beta'' \rho' \bar{\omega}') + \frac{\partial \bar{\omega}'}{\partial y} (\beta'' \rho' \bar{\omega}') \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

3) рівняння нерозривності потоку

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho' \left[1 + \beta'' \left(1 - \frac{\rho'}{\rho''} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] \cdot \left[\rho' \left(1 - \beta'' \frac{\rho'}{\rho''} \bar{\omega}' + \beta'' \bar{\omega}'' \right) \bar{\omega} \right] = 0. \quad (7)$$

Отже коефіцієнт тепловіддачі є функція наступних змінних

$$\alpha = f(q; \sigma; \rho; \rho''; r; v; \omega''). \quad (8)$$

Але в рівняннях (5, 6, 7) не враховується режим випару і спливання парового пухирця які відповідно характеризуються критеріями випару

$$\text{Рейнольдса } Re = \frac{q}{r \cdot \rho'' \cdot v} \left(\frac{\sigma}{g \rho} \right)^{0,5} \text{ й спливання Вебера } We = \frac{\rho'' \omega''^2}{\sigma} \left(\frac{\sigma}{g \rho} \right)^{0,5}.$$

З обліком сказаного, методом аналізу розмірності було отримане рівняння для розрахунку процесу теплообміну при кипінні розчину в поверхні, що рухається уздовж, нагрівання плівки, що має вигляд

$$Nu = x_1 Re^{x_2} \cdot We^{x_3} \cdot Pr^{0,4} \cdot e^{a \theta_{\text{тер}}}, \quad (9)$$

де x_1 , – безрозмірний коефіцієнт; x_2 , x_3 , a – безрозмірні степені.

Для перевірки на адекватність отриманого рівняння були проведені експерименти на лабораторній установці (рис. 8), що представляє собою випарний апарат з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє, із шириною каналу від 8 до 12 мм.

Пластини являють собою (рис. 9) плоский металевий лист поз. 4 розміром 1380Ч500Ч1,5 мм. Для твердості й опори на цих пластинах приварені штифти поз. 3 і 5. Розчинна пластина має приварену перегородку поз. 1, що ділить рух розчину в каналі на дві частини. У лівій частині пластини (1/3 ширини) рухається розчин без кипіння, тобто він перегрівається. У правій частині (2/3 ширини) рухається паророзчинна суміш. Такий характер руху сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі.

Конструктивні розміри пластини:

1. Ширина каналу $d=10$ мм.
2. Еквівалентний діаметр парового каналу $d_{\text{екв}}^{\text{п}}=0,0195$ м.
3. Еквівалентний діаметр розчинного каналу:
 - розчинної частини $d_{1\text{екв}}^{\text{р}}=0,0188$ м.;
 - паророзчинної частини $d_{2\text{екв}}^{\text{р}}=0,0194$ м.

Поверхня нагрівання становить $F=2,35$ м².

Виміри визначальних параметрів роботи дослідної установки проводилися при сталому режимі (відсутність пульсацій, стрибків тиску пари, що гріє, і постійному рівні розчину в сепараторі).

Дослідження роботи випарного апарату з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє проводилось на чотирьох режимах:

<u>1 режим</u>	
Випаровування при вакуумі в сепараторі	0,015 МПа
Температура вторинного пару	54 °С
Корисна різниця температур	11, 16, 21 °С
<u>2 режим</u>	
Випаровування при вакуумі в сепараторі	0,05 МПа
Температура вторинного пару	81 °С
Корисна різниця температур	10, 19, 25 °С
<u>3 режим</u>	
Випаровування при атмосферному тиску в сепараторі	0,1 МПа
Температура вторинного пару	100 °С
Корисна різниця температур	11, 20, 27 °С
<u>4 режим</u>	
Випаровування при тиску в сепараторі	0,151 МПа
Температура вторинного пару	111 °С
Корисна різниця температур	9, 16, 22 °С

Вибрані теплові режими проведення експериментальної роботи повністю охоплюють робочий діапазон теплових навантажень промислових випарювальних апаратів.

У результаті обробки отриманих даних методом найменших квадратів були розраховані безрозмірний коефіцієнт x_1 , і безрозмірні ступені x_2 , x_3 , а з рівняння (9), а так само знайдений новий коефіцієнт для розрахунку питомого теплового навантаження при кипінні розчинів у пластинчастій камері, що гріє.

Рівняння (9) для розрахунку процесу теплообміну при кипінні розчину в поверхні, що рухається уздовж, нагрівання плівки, остаточно приймає вид

$$Nu = 3,95 Re^{0,7} \cdot We^{0,16} \cdot Pr^{0,4} \cdot 2,73^{0,459t} \quad (10)$$

Для розрахунку питомого теплового навантаження при кипінні розчинів у пластинчастій камері, що гріє, при першому приближенні можна користуватися отриманим рівнянням

$$q = 26,7 \Delta t_{\text{общ}}^{1,4} \cdot \left(\frac{l_{\text{привед}}}{d_{\text{экв}}} \right)^{0,7} g_{\text{тер}}^{0,14} \cdot Pr^{0,4} \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)^{-0,06} \cdot e^{a g_{\text{тер}}} \quad (11)$$

Попередній розрахунок економічної ефективності за рахунок впровадження в промисловість ВА з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє, складений на підставі порівняння їх із широко розповсюдженими камерами, що гріють, трубчастого типу.

Він вівся тільки на підставі порівняння коефіцієнтів теплопередачі й витрати металу на 1 м² поверхні, що гріє. При цьому не враховувалась економія за рахунок спрощення виготовлення, скорочення габаритних розмірів, простоти обслуговування, оскільки вона може бути визначена тільки з обліком кожного конкретного випадку виготовлення й експлуатації.

Порівняльні показники за коефіцієнтом теплопередачі й питомій витраті металу двох конструкцій камер, що гріють, випарних апаратів на 1 м² поверхні, що гріє, наведені в таблиці.

Таблиця

Порівняльні показники випарних апаратів із трубчастою і ширококанальною пластинчастою камерами, що гріють

Коефіцієнт теплопередачі		Питома витрата металу	
Випарний апарат із ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє	Випарний апарат із трубчастою камерою, що гріє	Випарний апарат із ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє	Випарний апарат із трубчастою камерою, що гріє
Вт/м ² год·°С	Вт/м ² год·°С	кг/м ²	кг/м ²
3300	до 2000	до 20	45

З порівняння коефіцієнтів теплопередачі видно, що 1 м² поверхні, що гріє, ВА із ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє, може замінити $\frac{3300}{2000} = 1,65$ м² поверхні трубчастого випарювального апарата.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-практичної задачі розробки методик розрахунку та наукових основ проектування БКВУ для випарювання лужних та термолабільних розчинів у плівковому апараті. Досліджено процес кипіння розчинів у малому об'ємі, розроблена методика розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в ширококанальних розбірних

пластинчастих камерах що гріють, з падаючою плівкою. У процесі досліджень отримані наступні висновки:

1. Аналіз літератури показав що процес випарювання розчинів у БКВУ знайшов широке застосування практично у всіх галузях промисловості, але і досі теплотехнічні розрахунки БКВУ залишаються досить трудомісткими. У літературних джерелах не було виявлено достатньо відомостей про автоматизацію розрахунків БКВУ в яких би враховувалися всі відомі конструкції ВА, що значно ускладнює розрахунки та проектування нових, а також реконструкцію діючих випарювальних станцій.

2. Запропонована математична модель процесу випарювання розчинів в БКВУ, яка враховує всі значущі технологічні параметри. Для реалізації моделі створено програмний комплекс “МВУ-ФНП” для автоматизованих розрахунків БКВУ.

3. За допомогою програмного комплексу “МВУ-ФНП” були проведені розрахунки за запропонованою математичною моделлю й встановлені основні чинники які впливають на енергозбереження й інтенсифікацію процесу випарювання.

4. Проведено теоретичне дослідження процесу кипіння розчинів в прямокутній пластинчастій камері, що гріє з висхідно-падаючим двофазним потоком розчину і розроблено математичну модель цього процесу. На базі теоретичних досліджень була спроектована й змонтована лабораторна установка випарювального апарату з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє.

5. Виконано комплекс експериментальних досліджень і здобути експериментальні дані, які підтвердили адекватність розробленої моделі, і дозволили одержати нове критеріальне рівняння для розрахунку теплопередачі при кипінні розчину в ширококанальних розбірних пластинчастих камерах що гріють, з падаючою плівкою.

6. Програмний комплекс “МВУ-ФНП” для автоматизованих розрахунків БКВУ, прийнятий до використання при розрахунках й проектуванні БКВУ в Державному науково-дослідному й проектному інституті основної хімії /НІОХІМ/, м. Харків.

7. Спроектовано та випробувано конструкцію розбірної ширококанальної пластинчастої камери, що гріє, та методика її розрахунку, яка застосовується в процесі розрахунків і проектування випарного устаткування на ВАТ “УКРНДІХІММАШ”, м. Харків.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. В.Н. Путинцев, Д.И. Нечипоренко, В.С. Фокин, Е.Д. Понаморенко К вопросу энергосбережения при выпаривании электролитических щелочков. //Интегрированные технологии и энергосбережения.– Харків: НТУ “ХПІ”, 2002. - №4. - с.20-24.

Здобувачем проведено аналіз головних факторів які впливають на енерговитрати при випарюванні розчинів у багатокорпусних випарних установках.

2. В.С. Фокин, Д.И. Нечипоренко Сравнительный анализ работы выпарных аппаратов пленочного типа с трубчатой греющей камерой и пластинчатой греющей камерой. //Східно-Європейський журнал передових технологій.– Харків: Технологічний центр, 2004. - № 2 - с.29-32.

Здобувачем проведено обслідування й попередні експерименти процесу випарювання розчинів у камерах що гріють різних конструкцій. Запропонована нова конструкція камери що гріє, розроблена математична модель процесу в стаціонарних і динамічних умовах.

3. Д.И. Нечипоренко, В.С. Фокин, Е.Д. Понаморенко Моделирование работы многокорпусной выпарной установки. //Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".– Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - вип. 26 - с.111-114.

Здобувачем були розглянути цілі та задачі математичного моделювання роботи багатокорпусних випарних установок, а також проведено аналіз програмного забезпечення й представлено новий програмний комплекс "МВУ-ФНП" для автоматизованих розрахунків багатокорпусних випарних установок.

4. Д.И. Нечипоренко, В.С. Фокин, Е.Д. Понаморенко К вопросу энергосбережения при выпаривании растворов. //Інтегровані технології й енергозбереження.– Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №4. - с.42-47.

Здобувачем з допомогою програмного комплексу "МВУ-ФНП" були проведені комплексні дослідження роботи випарних апаратів різноманітних конструкцій і виявлені основні фактори, які впливають на можливість енергозбереження.

5. В.С. Фокин, Д.И. Нечипоренко, В.Г. Павлова Исследование процессов кипения растворов в стекающей пленке трубчатых и пластинчатых греющих камер. //Східно-Європейський журнал передових технологій.– Харків: Технологічний центр, 2006. - № 20, т.2 - с.80-82.

Здобувачем проведені теоретичні дослідження процесу кипіння в тонкій плівці і отримано новий коефіцієнт для розрахунку питомого теплового навантаження при кипінні розчину в ширококанальних розбірних пластинчастих камерах що гріють, з падаючою плівкою.

6. Д.І. Нечипоренко, В.С. Фокин Очистка стічних вод методом выпарювания //Матеріали Третьої Міжнародної конференції "Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки". м. Чернівці, 2005. - с.251-255.

Здобувачем проведені теоретичні дослідження впливу температури процесу кипіння на властивості термонестійких розчинів.

АНОТАЦІЇ

Нечипоренко Д.І. Закономірності теплообмінних процесів при випарюванні лужних та термолабільних розчинів у плівковому апараті нової конструкції. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.17.08. – процеси й устаткування хімічної технології. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, 2006 р.

Робота присвячена розробці наукових основ проектування випарних апаратів для випарювання лужних та термонестійких розчинів в хімічному та харчовому виробництвах. Досліджено закономірності процесу випарювання в багатокорпусних випарних установках.

Розроблено математичну модель процесу випарювання у БКВУ та автоматизований програмний комплекс “МВУ-ФНП” для наукових досліджень та практичних розрахунків випарювальних станцій. Створена нова конструкція поверхні нагріву ВА – розбірна ширококанальна пластинчаста камера, що гріє з висхідно-стікаючим рухом потоку розчину. Отримано математичну модель процесу кипіння розчинів в падаючій плівці. За допомогою лабораторної установки з новою конструкцією поверхні нагріву вивчено процес кипіння в малому об'ємі, а також отримано нове рівняння для розрахунку теплопередачі при кипінні розчину у стікаючій плівці.

Розроблено технічний проект випарного апарату з розбірною широко канальною пластинчастою камерою, що гріє.

Ключові слова: теплообмін, теплопередача, плівковий апарат, випарювання, конденсат, екстрапара, термолабільний розчин, ширококанальна пластинчаста камера, що гріє.

Нечипоренко Д.И. Закономерности теплообменных процессов при выпаривании щелочных и термолабильных растворов в пленочном аппарате новой конструкции. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08. – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, 2006 г.

Работа посвящена разработке научных основ проектирования выпарных аппаратов для выпаривания щелочных и термонестойких растворов в химическом и пищевом производстве. Исследованы закономерности процесса выпаривания в многокорпусных выпарных установках. Впервые разработана математическая модель процесса выпаривания в МВУ и автоматизированный программный комплекс “МВУ-ФНП” для научных исследований и практических расчетов выпарных станций.

Создана новая конструкция поверхности нагрева ВА – разборная ширококанальная пластинчатая греющая камера, с восходяще-стекающим движением потока раствора. Получена математическая модель процесса кипения растворов в падающей пленке. С помощью лабораторной установки с новой конструкцией поверхности нагрева изучен процесс кипения в малом объеме и получено новое уравнение для расчета теплопередачи при кипении растворов в стекающей пленке.

Разработан технический проект выпарного аппарата с разборной ширококанальной пластинчатой греющей камерой.

Ключевые слова: теплообмен, теплопередача, пленочный аппарат, выпаривание, конденсат, экстрапара, термолабільный раствор, ширококанальная пластинчатая греющая камера.

Nechiporenko D.I. Conformities to the law of heat-exchange processes at evaporation of alkaline and thermally not proof solutions in the pellicle vehicle of new construction. – Manuscript.

Dissertation on the competition of scientific degree of candidate of engineering's sciences on specialty 05.17.08. – are processes and equipment of chemical technology. – National technical university the “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2006.

Work is devoted development of scientific bases of planning of evaporation vehicle for evaporation of alkaline and thermally not proof solution in a chemical and food production. Conformities to the law of process of evaporation are investigational in multicabinet-type evaporation options (MEO). The mathematical model of process of evaporation is first developed in MEO and automated programmatic complex “МВУ-ФНП” for scientific researches and practical calculations of the evaporation stations.

The new construction of surface of heating of EV is created – demountable warming chamber from plates with the wide ducting's, with ascending-falling motion of solution. The mathematical model of process of boiling of solutions is in small volumes. By the laboratory setting with the new construction of surface of heating a boiling process is studied in a small volume and new equalization is for the calculation of heat-transfer at boiling of solutions in falling tape.

The technical project of выпарного vehicle is developed with demountable warming chamber from plates with the wide ducting's.

Keywords: heat-transfer, evaporation, steam, thermally not proof solution, demountable warming chamber from plates with the wide ducting's.