НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Павлова Вікторія Геннадіївна

УДК 66.011+66.021.4

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ УПАРЮВАННЯ РОЗЧИНІВ СОЛЕЙ У ВИПАРНОМУ АПАРАТІ ЗІ СТІКАЮЧОЮ ПЛІВКОЮ

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 на кафедрі теплотехніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти та науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Фокін Віталій Сергійович, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри теплотехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Перцев Леонід Петрович,
Відкрите акціонерне товариство Український науково-дослідний інститут хімічного машинобудування (ВАТ “УкрНДІХіммаш”), Міністерства промислової політики України, м. Харків, науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
Вінницький національний технічний університет, Міністерства освіти і науки України, м. Вінниця, завідувач кафедри теплоенергетики

Захист відбудеться “28” лютого 2008 р. о $10^{\underline{00}}$ 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" (61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21)

Автореферат розісланий “_25_” __січня_____ ___2008___ р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Тимченко В.К

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. У технологічних процесах різних галузей промисловості, в енергетиці, хімічній, харчовій, фармацевтичній і інших, широке застосування знаходить процеси упарювання розчинів солей.

До теперішнього часу для випаровування солевміщуючих розчинів використовуються багатокорпусні установки, обладнані випарними апаратами з винесеною зоною кипіння. Цим апаратам властиві гама недоліків: висока металоємкість, значна гідростатична депресія, що знижує корисну різницю температур, підвищені капітальні та експлуатаційні витрати, складність технічного обслуговування.

Тому перспективним є проведення досліджень, направлених на пошук раціональних конструкцій випарних апаратів для упарювання розчинів солей. Таким апаратом може служити випарний апарат із стікаючою плівкою, який раніше не застосовувався для упарювання розчинів, що супроводжується кристалізацією солей. Останнє обумовлене тим, що при недостатньо обґрунтованих рішеннях щодо режимно-геометричних параметрів апарату на його теплообмінній поверхні розвивалися процеси інкрустації зі всіма відомими негативними наслідками (заростання поверхні теплопередачі і погіршення процесу теплообміну).

У той же час апарати із стікаючою плівкою мають ряд переваг: відсутня гідростатична депресія, що збільшує корисну різницю температур, а це дозволяє зменшити необхідну поверхню нагріву, понизити час контакту розчину з поверхнею, що суттєве при роботі з термолабільними розчинами. Можливість апаратів із стікаючою плівкою працювати з малою корисною різницею температур в інтервалі 5…10 ^{o}C дозволяє збільшувати кратність використовування тепла пари, тобто понизити його питому витрату на одиницю випарюваної води.

У зв'язку з цим дослідження, направлені на створення високоефективних випарних апаратів із стікаючою плівкою для упарювання розчинів солей, є актуальними та мають науково-практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Основні результати дисертаційної роботи одержані в рамках виконання досліджень відповідно до держбюджетної теми МОН України за напрямком 7 “Енергетика, енергозбереження”: „Удосконалення методики чисельних розрахунків динамічних характеристик теплообмінних апаратів" (Д.Р № 0106U001470), де здобувач була виконавцем одного з напрямків.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження: розробка перспективної технології упарювання розчинів солей у випарних апаратах із стікаючою плівкою.

Основними задачами дослідження є:

– розробка моделі процесу теплообміну при кипінні стікаючої плівки суспензії і математичний опис цього процесу;

– визначення впливу на ефективність упарювання розчину введення в нього твердої фази і встановлення раціональної її концентрації;

– встановлення узагальненого критерійного рівняння, що описує процес теплообміну при кипінні суспензії у випарному апараті із стікаючою плівкою;

– встановлення адекватності запропонованої методики розрахунку шляхом зіставлення з результатами раніше проведеного експерименту.

Об'єкт дослідження – випарні апарати із стікаючою плівкою.

Предмет дослідження – процеси теплообміну і гідродинаміки упарювання розчинів солей при плівковому перебігу суспензії.

*Методи дослідження***.** Для вирішення поставлених задач використовувались методи математичного моделювання течії у трьохфазній рідинній плівці зі змінним вмістом фаз. Моделювання процесу течії досліджуємої плівки було виконано з урахуванням існуючих теорій та відомостей про закономірності процесів теплообміну, кипіння, випаровування, кристалізації та накипеутворення. Для розрахунку параметрів роботи випарного апарата зі стікаючою плівкою та коефіцієнта теплообміну були використанні диференційні та критериальні рівняння, а також наближенні формули, як існуючі , так і отримані автором. Аналіз та зіставлення отриманих у дисертації даних з отриманими експериментальним шляхом, дозволило підтвердити адекватність розробленої моделі.

Наукова новизна отриманих результатів:

– створена уточнена модель процесу теплообміну при кипінні суспензії у випарних апаратах із стікаючою плівкою з урахуванням впливу концентрації твердої фази на умови теплообміну;

– вперше на основі методу аналізу розмірностей отримано рівняння теплообміну, що відображає вплив твердої фази на інтенсивність теплообмінних процесів при упарюванні розчинів солей в стікаючій плівці;

– вперше, для апаратів зі стікаючою плівкою, запропонована технологія упарювання, що знижує швидкість інкрустації і дозволяє застосування даного типу випарних апаратів для упарювання розчинів з кристалізацією солей.

Практичне значення одержаних результатів в галузі хімічного машинобудування:

– обґрунтована можливість використовування випарного апарату із стікаючою плівкою стосовно розчинів з солями, що кристалізуються, завдяки чому істотно розширена область технічного застосування апаратів вказаного типу;

– запропоновано застосування методу добавки раціональної кількості твердої фази у упарюванний розчин, що дозволяє знизити швидкість накипоутворення на поверхні нагріву, збільшити, тим самим, період безпромивної експлуатації апарату і підвищити інтенсивність процесу теплопередачі;

–отримано критеріальна залежність для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі, яка може використатись при проектуванні випарних апаратів зі стікаючою плівкою.

Результати роботи упроваджені: при проектуванні та розрахунку випарних апаратів зі стікаючою плівкою на ВАТ “УкрНДІхіммаш”, (м. Харків) та в навчальний процес кафедри теплотехніки НТУ “ХПІ” при підготовці інженерних кадрів й викладанні курсів лекцій та лабораторних практикумів по дисциплінам “Теплотехнічні процеси та установки промислових підприємств”, “Проектування, монтаж та експлуатація теплообмінного обладнання”.

Апробація результатів роботи: Результати роботи доповідалися і обговорювались на наукових семінарах кафедри теплотехніки (2006, 2007 рр.), X, XI, XII, XIII міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2002, 203, 2004, 2005 рр.).

Публікації По темі дисертації опубліковано 9 статей у фахових виданнях ВАК України.

Об'єм і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 155 сторінок, з них 127 основний текст, 17 ілюстрацій по тексту, 2 таблиць по тексту, додатків на 17 сторінках, списку використаних літературних джерел, який складається з 112 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі зроблено аналіз актуальності теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження, обґрунтована необхідність подальшого вивчення процесів, викладенні наукова новизна отриманих результатів та відображено науково – практична цінність роботи.

В першому розділі виконано аналіз існуючих літературних джерел, в яких розглядаються процеси течії плівки рідини, процеси випаровування (пароутворення при кипінні), кристалізації та накипеутворення. Розглянути роботи В.Х. Мак–Адамса, С.С. Кутателадзе, Е.И. Несиса, В.И. Толубинского, Ю.М. Тананайко, Е.Г. Воронцова, В.И. Кутепова та інших. Зроблено аналіз застосування випарних апаратів щодо кристалізуючихся розчинів. Відображені переваги плівкових випарних апаратів у порівнянні з випарними апаратами з винесеною зоною кипіння.

На основі існуючих робіт відображено ефективність теплообміну при плівковій течії у порівнянні з теплообміном в об'ємі. Проаналізовано дослідження процесів теплообміну в стікаючої плівці рідини. Головним чином дослідження вчених спрямовані на розгляд течії одно- та двофазних потоків, які не вміщують тверду фазу – солі, що кристалізуються. Але присутність твердої фази декілька змінює картину теплообміну у порівнянні з чистим потоком. Дослідженню течії трьохфазної рідини з перемінним вмістом фаз приділялось недостатньо уваги. Однак значна частина розчинів включає солі, які при упарюванні кристалізуються як в об'ємі, так і на поверхні теплообміну. Кристалізація солей на поверхні теплообміну визиває погіршення процесу теплообміну, заростання поверхні теплопередачі, при цьому виникає необхідність частої промивки обладнання. Це є однією з причин стримуючих застосування плівкових випарних апаратів щодо розчинів з кристалізуючимися солями.

Розглянуті моделі пароутворення та методи розрахунку теплообміну при упарюванні. Приділено увагу процесам утворення, росту й відриву парової бульбашки.

Зроблено висновок про можливості застосування випарних апаратів зі стікаючою плівкою щодо розчинів солей, та необхідність більш глибокого дослідження процесів теплообміну при течії трьохфазної плівки зі змінним вмістом фаз. На жаль на даний час відсутність методики розрахунку теплообміну у стікаючої плівки трьохфазної рідини зі змінним вмістом фаз не дає можливості створювати та використовувати випарні апарати зі стікаючою плівкою застосовано щодо розчинів що вміщують кристалізуючуюся фазу.

В другому розділі представлена розроблена модель теплообміну у стікаючої плівці трьохфазної рідини зі змінними вмістом фаз. Обґрунтована модель упарювання в стікаючої плівці суспензії та виділено основні фактори, які впливають на процес теплообміну в плівці.

На базі існуючих теорій і теоретичних передумов розроблена методика розрахунку процесу теплообміну, знайдені узагальнені залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі, що враховують взаємний вплив процесів кипіння і кристалізації в процесі теплообміну в рідинній плівці суспензії.

При складанні моделі упарювання суспензії в стікаючій плівці допускалося, що зміна досліджуваного параметра є функцією координат і часу, дані параметри в даному перетині постійні. До того ж ще однією вимогою є те, що побудована, таким чином модель повинна достатньо повно відображати реальну картину протікаючих у випарному апараті процесів.

При створені моделі теплообміну течії плівки (рис.1) виходили з наступного: суспензія, що поступає в апарат, містить деяку кількість твердої фази (5–15%). При течії плівки суспензії по поверхні теплообміну відбувається паротворення і кристалізація. Дані процеси йдуть по всій довжині труби – шляху руху суспензії, в якій парова, рідка і тверда фаза рівномірно

розподілені в товщині плівки. Така рівномірність зберігається по всій довжині, таким чином, рідка, парова і тверда фази спільно течуть уздовж поверхні нагріву. Досягається такий розподіл за рахунок турбулентності рухомого потоку і обмеженої стійкості перегрітої рідкої фази (метастабільний стан) за наявності збудників фазового перетворення (зародки кристалів твердої фази).

Рис 1. Схема течії плівки суспензії

Нові парові бульбашки можуть утворюватися на поверхні теплообміну, за рахунок відхилення фізичних величин, що характеризують рівноважний стан середовища – тобто флуктуацій. При цьому йде зниження відносної швидкості пари і створюється однорідна суміш. Вплив рухомих кристалів на відносну швидкість фаз незначний, оскільки їх масовий зміст малий. Але при підвищенні вмісту кристалів має місце пригашення турбулентності.

Кількість твердої фази, що виділилася при кипінні, залежить від ступеня перегріву суспензії і визначає густину багатофазної суміші, розподіл фаз, швидкість руху. Перегрів розчину забезпечується підведенням тепла через поверхню теплообміну.

Механізм перенесення тепла при плівковій течії розчинів солей зі змінним змістом фаз вельми складний, недостатньо вивчений і вимагає теоретичного і експериментального дослідження. Для вирішення цієї проблеми розглядали турбулентний плівковий рух суспензії із змінним змістом фаз по внутрішній поверхні трубки.

Інтенсивність процесу теплообміну при кипінні тісно пов'язана з процесами паротворення. Парова фаза створюється на внутрішній поверхні плівці – на поверхні теплообміну. Механізм передачі тепла – теплопровідність. Процес перенесення тепла визначається процесом пароутворення.

Процеси пароутворення носять вірогідний характер. Механізм утворення парової фази можна представити слідуючим чином (рис.2). У невеликому об’ємі через флуктуації густини в центрах паротворення, на поверхні теплообміну, створюється невеликі парові включення. Частина яких з розміром менш за критичній, зникає. Інші, при належних умовах ростуть. Із зростанням перегріву рідини з однієї стороні

Рис. 2. Відображення процесів утворення, росту та відриву парової фази в плівці рідини на поверхні теплообміну.

зростає вірогідність появі житездатної парової фазі з необхідними розмірами, з іншої – зменшується необхідний розмір для житездатності парових бульбашок.

Зникнення парових бульбашок малих розмірів пояснюється дією роботи зміни об'єму, яка при малих розмірах, менших за критичний, не в змозі компенсувати енергетично невигідний ефект появі розділу між рідиною та паром. Парові бульбашки, які мають розміри більш за крітічній – ростуть. Швидкість зростання та відриву парової фазі являється однієї з основних характеристик теплообміну при кипінні.

Існуючі роботі доводять, що випарювання у парову бульбашку йде за рахунок існуючого пристінного шару під бульбашкою, а також випаровування перегрітої рідини примикаючий до поверхні. Існує декілька моделей утворення та росту парової фази: Лабунцова Д.А., Ягова В.В., Малюнкова І.Г. та інших. Відрив парової фазі йде з визначенною частотою, та при досягненні парової бульбашки відривного діаметру (рис.2). Із зростанням теплового потоку частота відриву росте.

Випаровування приводить до зміни концентрації рідинної фази. Все вищесказане відображає картину упарювання в плівці рідини. Але присутність твердої фазі змінює картину теплообміну. Це відбувається через те, що тверда фаза міняє фізико–хімічні властивості речовини та гідравлічну характеристику плівки розчину. Данні зміни можуть привести як до підвищення теплообміну, так і його падіння. Пояснюється тим, що при малих концентраціях твердої фази, за рахунок хаотичного руху часточок твердої фази, йде збільшення швидкості відриву парової фази від поверхні нагріву, що веде до збільшення турбулізації потоку, також тверда фаза прориває пристінний пограничний шар (рис.3). Відомо, що пристінний пограничний шар впливає на процеси теплообміну, ускладнює тепловіддачу. Прорив та руйнування пристінного пограничного шару веде до збільшення тепловіддачі в цілому. При досягненні певного значення концентрації твердої фазі спостерігається зменшення коефіцієнту тепловіддачі. Це відбувається тому, що через існуючу силу тертя між твердими частками, йде дисипація кінематичної

Рис. 3. Відображення виникнення, зростання і всплиття парової фази за наявності твердої фази в плівці суспензії: 1 – прикордонний шар; 2 – суспензія; 3 – кристали; 4 – парові бульбашки.

енергії турбулентного руху.

При розгляді процесів кристалізації в апаратах доводиться вирішувати питання зменшення швидкості кристалізації на поверхнях теплообміну апарату.

Виділення солей йде частково в об'ємі рідкої фази – в плівці рухомої по поверхні теплообміну, частково відкладається на поверхні вже існуючих кристалів або домішки, які міститься в розчині, а частково на внутрішній поверхні нагріву.

Відкладення кристалів на поверхні нагріву йде унаслідок того, що на утворення зародка кристала на поверхні витрачається менша робота, ніж на утворення нових кристалів в плівці рідини, до того ж в прилеглому до поверхні теплообміну шарі, так званому пристінному шарі виникають локальні перенасичення по даних солях. Перенасичення є однією з причин випадання з розчину кристалів солей і осіданню їх на поверхні нагріву. Такий стан досягається за рахунок випаровування випарника і зміни концентрації суспензії. Спливаючі парові бульбашки, що відірвалися, залишають за собою слід з крихітних кристалів, до яких унаслідок міжмолекулярної взаємодії нашаровуються кристали солей, розчинених в розчині, це теж призводить до кристалоутворення на поверхні теплообміну.

За наявності готових кристалів солей має місце низькі ступені пересичення, вірогідність утворення нових зародків кристалів незначна.

Так само як і для міхура пари, так і для кристала існує деякий критичний розмір початку зростання. При зіткненні рухомих кристалів можливе руйнування кристалів, частина яких, та, що має розмір менше за критичний розчиняється, а кристали, що мають критичний розмір і більш ростуть. Зростання кристала, що утворився при зіткненні, можна розглядати як ланцюговий процес зростання, за умови постійного надходження молекул кристалічної фази і процес цей характеризується деякою вірогідністю.

Рис.4. Схема проривання пристінного підшару кристалами твердої фази.

У третьому розділі пропонується математична модель теплообміну у плівці трьохфазної рідини зі змінним вмістом фаз. Розглянуті питання адекватності розробленої моделі реальним процесам тепловіддачі в стікаючій плівці рідинної суспензії із змінним вмістом фаз. Обґрунтоване застосування методу аналізу розмірностей для вирішення поставленої в дисертації задачі, пов'язаної з визначенням параметрів, що характеризують теплообмін в стікаючій плівці розчину солей із змінним вмістом фаз.

При створені математичної моделі, описуючої теплообмін у рухомій плівці трьохфазної рідини зі змінним вмістом фаз розглядали суспензію, у межах елементарного об'єму як суцільний потік з середніми параметрами. Сама ж рідина – трьох компонентна механічна суміш. Температура твердої часточки дорівнює температурі оточуючої її рідини. Існуючі роботі Річардсона та Сміта доводять, що теплопровідність твердої частки практично не впливає на інтенсивність теплообміну, тому її можна не враховувати.

Унаслідок малої товщини плівки її течію навіть на викривлених поверхнях (труби, насадки) можна розглядати як плоску в системі х–у координат. При виводі рівнянь нерозривності та руху трьохфазної рідини зі змінним вмістом фаз враховували дію сил тяжіння, тиску, тертя та вперше вбула розглянута дія сил поверхневого натягу. Запропоновано висновок диференціального рівняння енергії. Вплив процесів кристалізації описаний рядом критеріальних рівнянь змін вмісту твердої та рідкої фаз, балансом числа твердої фази.

- Рівняння руху стікаючої плівки при паротворенні на поверхні нагріву –

$$\begin{aligned}
&\varphi_{ж}\rho_{ж}\omega_{ж}\left(\frac{\partial\omega_{ж}}{\partial x}+\frac{1}{\omega_{ж}}\frac{\partial\omega_{ж}}{\partial\tau}\right)+\varphi_{п}\rho_{п}\omega_{п}\left(\frac{\partial\omega_{п}}{\partial x}+\frac{1}{\omega_{п}}\frac{\partial\omega_{п}}{\partial\tau}\right)+\\
&\varphi_{т}\rho_{т}\omega_{т}\left(\frac{\partial\omega_{т}}{\partial x}+\frac{1}{\omega_{т}}\frac{\partial\omega_{т}}{\partial\tau}\right)+\left(\omega_{ж}-\omega_{т}\right)\left[\frac{\partial}{\partial\tau}\left(\varphi_{ж}\rho_{ж}\right)+\omega_{ж}\frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_{ж}\rho_{ж}\right)\right]+\\
&+\left(\omega_{п}-\omega_{т}\right)\left[\frac{\partial}{\partial\tau}\left(\varphi_{n}\rho_{n}\right)+\omega_{n}\frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_{n}\rho_{n}\right)\right]=g\left(\varphi_{ж}\rho_{ж}+\rho_{m}-\rho_{n}\right)-\frac{\partial P}{\partial x}+\\
&+\mu\frac{\partial^{2}\omega_{x}}{\partial x^{2}}+\left(\sigma_{n-ж}-\sigma_{ж-m}\right)\frac{\partial^{3}\delta}{\partial x^{3}};
\end{aligned}\qquad(1)$$

- рівняння нерозривності стікаючої плівки трифазного потоку із змінним вмістом фаз –

$$\frac{\partial}{\partial\tau}\left(\varphi_{ж}\beta_{ж}+\rho_{n}\beta_{n}+\rho_{т}\beta_{т}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_{ж}\beta_{ж}\omega_{ж}+\rho_{n}\beta_{n}\omega_{n}+\rho_{т}\beta_{т}\omega_{т}\right)=0;\qquad(2)$$

- рівняння енергії трифазного потоку –

$$\begin{aligned}
&\beta_{ж}\rho_{ж}c_{ж}\left(\frac{\partial t}{\partial\tau}+\overline{\omega}_{ж}\frac{\partial t}{\partial x}+\overline{\omega}_{ж}\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\beta_{n}\rho_{n}c_{n}\left(\frac{\partial t}{\partial\tau}+\overline{\omega}_{n}\frac{\partial t}{\partial x}+\overline{\omega}_{n}\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\\
&+\beta_{m}\rho_{m}c_{m}\left(\frac{\partial t}{\partial\tau}+\overline{\omega}_{m}\frac{\partial t}{\partial x}+\overline{\omega}_{m}\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\left(\rho_{n}+r\rho_{m}\right)}{\tau^{2}}=\left(\beta_{ж}\lambda_{ж}+\beta_{n}\lambda_{n}+\beta_{m}\lambda_{m}\right)\left(\frac{\partial^{2}t}{\partial x^{2}}+\frac{\partial^{2}t}{\partial y^{2}}\right);
\end{aligned}\qquad(3)$$

- зміна густини зрошування –

$$\frac{dm}{d\tau} = m_0\left(\frac{\partial \beta_т}{\partial \tau} + \overline{\omega}_x \frac{\partial \beta_т}{\partial x} + \overline{\omega}_y \frac{\partial \beta_т}{\partial y}\right). \quad (4)$$

де $u_ж$, $u_п$, $u_т$ – об'ємний вміст рідкої, парової та твердої фази; $c_ж$, $c_п$, $c_т$ – густина рідкої, парової та твердої фази, кг/м^3 ; $ш_ж$, $ш_п$, $ш_т$ – швідкість рідкої, парової та твердої фази, м/с; $c_ж$, $c_п$, $c_т$ – теплоємність рідкої, парової та твердої фази кДж/кг; $л_ж$, $л_п$, $л_т$ – коефіцієнт теплопровідності рідкої, парової та твердої фази, Вт/(м·К); $r_п$, $r_{кр}$ –прихована теплота паротворення та кристалотворення, кДж/кг; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; ; y – поверхний натяг, Н/м; m – густина зрошування, кг/(м^2·с)

Також система диференційних рівнянь включає рівняння зміни вмісту твердої фази суспензії, зміна концентрації рідкої фази, зміна концентрації насичення твердої фази, збереження маси рідкої фази, рівняння збереження маси твердої фази, рівняння балансу; рівняння тепло– і масообміну.

Значній внесок у процеси теплообміну вносить пристінний пограничний шар. Тому система диференційних рівнянь повинна включати диференційне рівняння перенесення твердої частки в пристінному пограничному шарі. Але подібне рівняння відсутнє. Це значним чином ускладнює рішення системи диференційних рівнянь.

Для розрахунку параметрів теплообміну запропоновані наступні рівняння:

- початкова густина зрошування для рідинної суспензії –

$$\overline{m}_0 = m_0 \left(1 + \beta_{т_0}\right); \quad (5)$$

- середня густина зрошування по перетину –

$$\overline{m}_x = m_0 \left(с_{их} + \beta_{т_0} + 0{,}01 b_0 \left(R'_0 - R'_x\right)\right); \quad (6)$$

- швидкість течії в будь-якому перетині –

$$\overline{\omega}_x = \frac{\overline{m}_x}{\rho_x \cdot \overline{\delta}_x}; \quad (7)$$

- товщина плівки в будь-якому перетині –

$$\overline{\delta}_x = \delta_0 \cdot \left(с_{их} \left(1 + \beta_{тх}\right)\right); \quad (8)$$

де початкова товщина плівки визначається по рівнянню одержаному в роботі Кутателадзе

$$\delta_0 = 0{,}141 \cdot \nu_0^{0{,}667} \cdot \left(\frac{m_0}{\rho_0 \cdot \nu_0} \right)^{0{,}58};$$

- масовий зміст твердої фази по перетину –

$$\beta_{тх} = \frac{1}{c_{их}} \left[\beta_{т0} + 0{,}01 b_0 \left(R'_0 - R'_x \right) \right]; \qquad (9)$$

- розчинність компонентів, що кристалізуються і не кристалізуються –

$$R'_0 = \frac{b'_0}{b_0};\ R'_x = \frac{b'_x}{b_x};\ R_x = \frac{b_{вх}}{b_x};\ b_{вх} = 1 - b_x - b'_x.$$

Рішення системи диференціальних рівнянь, що описують процес теплообміну в стікаючій плівці суспензії, утруднене через складнощі як фізичного, так і математичного характеру і отже подальше рішення поставлених в роботі задачі можна представити використовуючи апарат аналізу розмірностей.

На підставі проведених досліджень, можна сказати, що функціональну залежність коефіцієнта тепловіддачі від визначальних його параметрів виражається таким чином

$$\alpha = f(d_{эк}, t, p, \rho_n, \rho_{ж}, r, c_{ж}, \lambda_{ж}, \mu_{ж}, \sigma_{ж}, \nu_{ж}, \omega'', q, n, \theta, \beta_т). \qquad (10)$$

В результаті методом аналізу розміростей було отримано ряд критеріїв:

$$d_0 = \left(\frac{\sigma}{g \left(\rho_{ж} - \rho_n \right)} \right)^{0{,}5}; \qquad Nu = \frac{\alpha\, d_0}{\lambda}; \qquad \mathrm{Re}_k = \frac{\omega'' \cdot d_0}{\nu}; \qquad \omega'' = \frac{q}{r \cdot \rho_n};$$

$$\mathrm{We} = \frac{\omega'' \cdot \rho_п d_0}{\sigma}; \qquad \mathrm{Pr}_р = \frac{c_р \mu_р}{\lambda_р},$$

та одержана наступна функціональна залежність –

$$Nu = f\left(\mathrm{Re}_k, \mathrm{Pr}, We, \left(\frac{\upsilon}{\Delta t} \right), e^{\beta_т} \right).$$

Складові якої відображають вплив

$\upsilon = \frac{r\rho_n}{c\rho_{ж}}$ – постійна випаровування , яка представляє відношення об'ємної теплоти випаровування до об'ємної теплоти розчину;

We – критерій Вебера, характеризує інтенсивність перенесення парового міхура в рухомій рідкій фазі;

Re_k– характеризуючий кипіння (паротворення) розчину;

Pr – фізико–хімічні властивості розчину;

$\beta_т$ – масова доля твердої фази, характеризує вплив кристалічної фази.

Таким чином, методом аналізу розмірностей отримано ряд критеріїв, що відображають вплив на процес теплообміну ряду чинників: фізико-хімічні властивості рідини, інтенсивність перенесення паровій бульбашки в рухомій рідкій фазі, кипіння розчину, вплив кристалічної фази.

У четвертому розділі представлено результати обробки експериментальних даних та отримана критеріальна залежність для розрахунку теплообміну в стікаючій плівці трьохфазної суспензії із змінним вмістом фаз. Розроблена нова методика розрахунку коефіцієнта тепловіддачі для багатофазної суспензії із змінним вмістом фаз, яка враховує фізико-хімічні властивості розчину, режим течії, дію сили поверхневого натягу, процеси кипіння і випаровування, вплив твердої фази на процес тепловіддачі. Відображена ефективність теплопередачі в стікаючій плівці суспензії із змінним вмістом фаз при додаванні в початкову суспензію деякої кількості готової твердої фази. Розглянуто вплив твердої фаза на процес теплообміну. Ступінь її впливу залежить від вмісту твердої фази в суспензії. Так, при зростанні вмісту твердої фази в рідинній суспензії коефіцієнт теплообміну спочатку росте, але при досягненні концентрації певного значення знижується.

Обробка експериментальних даних дала можливість визначити невідомі коефіцієнти в одержаному рівнянні теплообміну

$$Nu = 265{,}5\,\mathrm{Re}_k^{x1}\mathrm{Pr}^{x2}\mathrm{We}^{x3}\left(\frac{\upsilon}{\Delta t}\right)^{x4} e^{\beta_т \tilde{x}5}. \qquad (11)$$

Для виявлення основних закономірностей перебігу процесу бралися експериментальні дані УкрНДІхиммаша (м. Харків). Результати досліджень предоставлені науковим керівником дисертації проф. В.С.Фокіним, який проводив їх на експериментальних установках в ГосНДІХлропроєкте (м. Москва), Сакському хімзаводі (м. Саки) і Першотравневому ПО “Химпром” (Харківська область). Досліджуваними розчинами були насичені солями NaCl і $KMnO_4$ системи $NaOH+NaCl+H_2O$ і $KOH+KMnO_4+H_2O$ (солі з умовно постійною розчинністю і зворотною розчинністю).

Дослідження проводилися при наступних параметрах:

- концентрація, % мас: розчин $NaOH+NaCl$ – 26-46; розчин $KOH+KMnO_4$ – 50-80;

- вміст твердої фази в стікаючій суспензії, %. 0; 5; 8; 10; 15.
- розміри твердої фази в суспензії NaCl – 80-120 мкр; $KMnO_4$ – 50-80 мкр;

Для вивчень бралися розчини з різним початковим вмістом твердої фази (рис.5). Випробування спочатку проводилися на відфільтрованих розчинах KOH і NaOH, а потім при упарюванні суспензії з початковим додаванням твердої фази. На рис. 5 відображені результати експериментів для розчинів з $\beta_т$ 0 %, $\beta_т$ 5 %, $\beta_т$ 10 %. Як показали дослідження при $\beta_т$ 0 % (відфільтрований розчин) спостерігалось швидке падіння коефіцієнту тепловіддачі та швидке заростання поверхні теплообміну накипом. Данні процеси можна пояснити наступним: в відсутності в плівці суспензії готової твердої фази значна частина кристалізуючогося компонента утворює накип на поверхні теплообміну, що приводить до заростання поверхні теплообміну та падіння теплопередачі. Це пояснюється тим що на утворення нового кристала на поверхні нагріву витрачається менша робота, чим на спонтанне кристалоутворення в плівці, а бульбашки пару, які відірвались від поверхні теплообміну, залишають слід з кристалів солей, що в стають центрами утворення накипу. При додаванні в початковий розчин кристаликів твердої фази на початку процесу упарювання, спостерігалось незначне падіння коефіцієнту тепловіддачі та незначне заростання поверхні теплообміну накипом. Тому, що кристали, які знаходяться в суспензії, є центрами кристалізації для фази, яка кристалізується і тим самим зменшується процес утворення накипу на поверхні теплообміну.

Рис. 5. Зміна коефіцієнта теплопередачі за часом роботи випарного апарату

По результатам досліджень також були отримані графіки залежностей (рис. 6). На рис. 6 відображено вплив вмісту твердої фази на процес тепловіддачі. Як видно з графіків, із збільшенням частки вмісту твердої фази коефіцієнт тепловіддачі на початку зростає до певного значення концентрації, а потім знижується. Дане зростання і зниження значення коефіцієнта тепловіддачі було передбачене теоретично, на підставі теоретичних досліджень і відображено в першій частині роботи та можна пояснити наступним: із збільшенням концентрації твердої фази росте турбулізація потоку за рахунок хаотичного руху твердих

Рис. 6**.** Графіки залежності коефіцієнта теплообміну від вмісту твердої фази
а – NaOH 26%; *б* – NaOH 46 %; *в* – KOH 50 %; *г* – KOH 80 %.

частинок, які проривають прикордонний шар, впливають на зріст та відрив парової фази, що додатково збільшує турбулізацію плівки. Це пояснює зростання коефіцієнта тепловіддачі в діапазоні $в_т$ до 10–12%. З подальшим зростанням змісту твердої фази зростає густина розчину та ускладнюється вільний хаотичний рух твердої частинки, турбулентність потоку гаситься. Таким чином можна пояснити зменшення коефіцієнта тепловіддачі при підвищенні концентрації твердої фази.

Результати дослідів дозволили отримати та проаналізувати графіки залежності теплообміну, вираженого через критерій Nu, від розглядаємих параметрів процесу теплообміну (рис.7–9). Їх обробка методом найменших квадратів дала наступні показники x_1=0,35, x_2=0,4, x_3=0,19, x_4=0,65, x_5=0,97.

Одержане наступне критерійне рівняння

$$Nu = 265{,}5\,\mathrm{Re}_{к}^{0,35}\,\mathrm{Pr}_{ж}^{0,4}\,We_{п}^{0,19}\left(\frac{\upsilon}{\Delta t}\right)^{0,65}\left(\beta_{т}\right)^{0,97}. \qquad (12)$$

Рис. 7-9 Графіки залежності

При відсутності твердої фази ($\beta_т$=0) дане критеріальне рівняння може бути застосоване до розрахунку теплообміну чистих рідин.

Проведені розрахунки по рівнянню (12) показали, що результати розрахунків задовільно узгоджуються з одержаними експериментальними даними (рис. 10), як для чистих розчинів так і для розчинів солей, що дозволяє рекомендувати це рівняння для інженерних розрахунків. Відхилення склали 4–15%.

Порівняння отриманих значень коефіцієнта тепловіддачі по одержаній критерійній залежності (12) і експериментальних даних підтвердили адекватність створеної моделі реальним процесам тепловіддачі, протікаючим в стікаючій плівці трьохфазної суспензії із змінним вмістом фаз. Перевірка рівняння показала, що рівняння з допустимою похибкою

а *б*

Рис.10. Графіки порівняння отриманих значень коефіцієнта тепловіддачі по одержаній критерійній залежності (12) з експериментальними

надає можливість розрахунку теплообміну у плівці трьохфазної рідини зі змінним вмістом фаз і може застосовуватися при інженерно–конструкторських розрахунках апаратів даного типу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТІ ТА ВІСНОВКІ

Дисертація дозволяє вирішувати актуальну науково-практичну задачу – обґрунтування застосування для упарювання сольових розчинів плівкових випарних апаратів із стікаючою плівкою, замість великогабаритних і металоємких випарних апаратів з трубою вскипання. У дисертаційній роботі проведене дослідження плівкового перебігу трифазних суспензій із змінним змістом фаз (розчин, тверда і парова фази). Проведений аналіз дозволив розробити фізичний механізм процесу і його математичний опис.

В результаті проведеної роботи сформулювані висновки:

1. Аналіз публікацій по темі дисертації показав необхідність подальшого дослідження процесу упарювання розчинів солей у випарному апараті із стікаючою плівкою, вивчення впливу твердої фази на теплообмін в плівці суспензії, а так само взаємного впливу протікаючих процесів (кипіння, паротворення і кристалізації) при перебігу багатокомпонентної плівки суспензії.

2. Запропоновано модель процесу плівкового перебігу розчинів солей у випарному апараті із стікаючою плівкою, яка враховує вплив твердої фази на процес теплообміну в стікаючій плівці рідинної суспензії.

3. Одержано математичний опис процесу плівкової течії трифазній суспензії із змінним вмістом фаз у випарному апараті із стікаючою плівкою, яке містить рівняння руху трифазного потоку із змінним змістом фаз, рівнянь нерозривності і енергії, рівнянь зміни концентрацій рідкої і твердої фаз.

4. Одержано критерійне рівняння (12) для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі для розчинів солей, що містять тверду фазу.

5. Запропоноване внесення раціональної кількості кристалів твердої фази (5–15 %) для випарних апаратів із стікаючою плівкою, що дозволить понизити швидкість утворення накипу і збільшить час безпромивної роботи апарату.

6. Розглянутий вплив твердої фази на інтенсивність теплообміну і швидкість відкладення солей на поверхні нагріву при упарюванні сольових розчинів в стікаючій плівці. Вміст твердої фази в початковому розчині в раціональному діапазоні 5–15 % приводить до збільшення інтенсивності теплообміну, подальше збільшення змісту твердої фази надає негативну дію на процес теплопередачі.

7. Обгрунтована можливість застосування випарних апаратів із стікаючою плівкою для упарювання растворов солей, що кристалізуються в процесі упарювання, що дозволить розширити область застосування даного типу випарних апаратів.

8. Обробка експериментальних даних підтвердила адекватність запропонованої методики розрахунку шляхом зіставлення з результатами раніше проведеного досліду, відхилення результатів розрахунку складали 4–15 %.

9. Результати роботи упроваджені: при проектуванні та розрахунку випарних апаратів зі стікаючою плівкою на ВАТ "УкрНДІхіммаш", (м. Харків) та в навчальний процес кафедри теплотехніки НТУ "ХПІ".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фокин В.С, Кошельник В.М., Павлова В.Г. Математическая модель теплообмена при вынужденном движении жидкостных суспензий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1998.–№13. –С.37-40.

Здобувачем розглядається математична модель теплообміну при русі рідинних суспензій пристосовано до промислових випарних апаратів для упарювання розчинів з кристалізаціею солей.

2. Фокин В.С., Павлова В.Г Основы переноса тепла при пленочном движении жидкостной суспензии // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2002.–№6.Т.1., – С.94–97.

Здобувачем досліджуються процеси переносу тепла при плівкової течії суспензії із змінним вмістом фаз в випарному апараті зі стікаючою плівкою, наведені отримані диференційні рівняння енергії та теплообміну.

3. Фокин В.С., Павлова В.Г. Математическая модель переноса тепла при пленочном течении жидкостной суспензии // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2002. – №9, т.12., – С.181–186.

Здобувачем пропонуються фізична та математична моделі теплообміну при русі суспензій в багатокорпусних випарних установок зі стікаючою плівкою. Представлена система диференціальних рівнянь та критериальне рівняння, які описують теплообмін в стікаючій плівці.

4. Павлова В.Г. Теплообмен при пленочном течении трехфазной жидкостной суспензии в выпарных аппаратах.// Коммунальное хозяйство городов. – Київ: "Техніка", 2003.–№49, С.70–74.

5. Фокин В.С., В.Г.Павлова. Влияние твердой фазы на процессы упаривания кристаллизирующихся растворов в аппаратах со стекающей пленкой// Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. –№9.т.2. – С. 180–183.

Здобувачем розглядається вплив твердої фази на процеси упарювання кристализуючихся розчинів. Зроблені висновки стосовно можливості застосування плівкових випарювальних апаратів зі стікаючою плівкою що до розчинів з вмістом кристалізуючихся солей.

6. Фокин В.С., Павлова В.Г. Математическое описание рабочих процессов выпарных аппаратах с трубой вскипания.// Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003.–№4.–С. 46–55.

Здобувачем наведені результати математичного опису процесів теплообміну при русі багатофазної суміші з змінним вмістом фаз в випарних апаратах.

7. Фокин В.С., Павлова В.Г. Тепломассообмен при пленочном течении многокомпонентной жидкости суспензии// Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – № 12. – С.123–126.

Здобувачем наведені результати теоретичного дослідження плівкової течії рідинної суспензії із змінним вмістом фаз. Процес плівкової течії розглядався в трифазній рідині, що складається з рідкої, твердої і парової фаз та проаналізовано їхній взаємний вплив на процеси теплообміну й особливості даного процесу.

8. Фокин В.С., Павлова В.Г., Данилов Д.Ю. Использование метода анализа размерностей для определения уравнений переноса тепла в выпарных аппаратах // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005.– №29. – С.99–100.

Здобувачем наведені результати математичного моделювання теплообмінних процесів у випарних апаратах зі стікаючою плівкою. Запропоновано рішення системи диференціальних рівнянь методом аналізу розмірності. Обгрунтована закономірність застосування метода аналізу розмірностей в цьому випадку. Отримане рівняння описуюче процес теплообміну в плівці суспензії.

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

Здобувачем проведені теоретичні дослідження процесу кипіння в тонкій плівці. В результаті обробки даних було отримано нове рівняння для розрахунку процесу теплообміну при кипінні розчинів солей в стікаючої плівці.

АНОТАЦІЯ

Павлова В.Г. Закономірності теплообміну при упарюванні розчинів солей в випарному апараті зі стікаючою плівкою – Рукопіс.

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

Дисертаційна робота присвячена дослідженню течії плівки розчинів солей зі змінним вмістом фаз в випарних апаратах зі стікаючою плівкою, а також обґрунтуванню можливостей застосування випарних апаратів зі стікаючою плівкою щодо розчинів з солями, що кристалізуються в процесі упарювання. Запропоновано метод, який дозволяє знизити процеси утворення накипу на поверхні нагріву, таким чином, зменшити швидкість заростання поверхні нагріву, підвищити інтенсивність процесу теплообміну в стікаючої плівці і також збільшити ефективність випарних апаратів. Розглянути процеси теплообміну в стікаючої плівці. Розкриті закономірності сумісного протікання в плівці розчинів солей процесів теплообміну, випаровування, кипіння та утворення накипу у випарних апаратах зі стікаючою плівкою. Розглянуто вплив твердої фази на процеси теплообміну, на підвищення інтенсивності процесу та збільшення ефективності випарного апарату.

На основі існуючих теорій та відомостей про процеси плівкової течії та кристалізації розроблена модель течії плівки розчинів солей у випарному апараті зі стікаючою плівкою. Приведені диференційні рівняння, описуючи теплообмін в плівці трьохфазної суспензії (рідка, парова та тверда фази), отримані залежності для інженерно-конструкторських розрахунків параметрів теплообміну в випарних апаратах зі стікаючою плівкою.

Отримане критеріальне рівняння теплообміну для плівкової течії трьохфазної рідини із змінним вмістом фаз. Запропонована нова методика розрахунку коефіцієнту тепловіддачі для плівки трьохфазної суспензії.

Ключові слова: теплообмін, упарювання, пароутворення, кристалізація, випарні апарати зі стікаючою плівкою, плівкова течія, розчини солей, трьохфазна суспензія.

Павлова В.Г. Закономерности теплообмена при упаривании растворов солей в выпарном аппарате со стекающей пленкою – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08.– процессы и аппараты химической технологии. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт".

Процессы упаривания нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Дальнейшее совершенствование используемых в промышленных условиях

процессов и аппаратов химической технологии и смежных отраслей ставят перед инженерами и конструкторами задачи поиска и разработки новых технологических процессов, которые позволили бы не снижая качества готовой продукции снизить капитальные и эксплуатационные затраты. Одним из перспективных типов выпарных аппаратов является пленочные выпарные аппараты со стекающей пленкой. Имея ряд преимуществ, их применение ограничено требованиями по чистоте выпариваемой жидкости. Однако значительная часть растворов содержит соли, кристаллизирующиеся в процессе выпаривания. В этом случае возникает ряд научных и технических задач, связанных с ответами на вопрос о возможности применения пленочных выпарных аппаратов в случае солесодержащих растворов, суспензий.

Анализ современного состояния проблемы показал недостаточность изученности процессов пленочного течения трехфазных суспензий в выпарных аппаратах со стекающей пленкой. В связи с этим представляет интерес исследование возможности применения пленочных выпарных аппаратов со стекающей пленкой к кристаллизирующимся растворам.

Диссертационная работа посвящена исследованию течения пленки трехфазной жидкости с переменным содержанием фаз в выпарных аппаратах со стекающей пленкой, а также обоснованию возможностей применения выпарных аппаратов со стекающей пленкой применительно к растворам с солями, которые кристаллизируются в процессе упаривания. Предложен метод, который позволяет снизить процессы кристаллизации солей на поверхности нагрева, таким образом, уменьшить скорость зарастания поверхности нагрева, повысить интенсивность процесса теплообмена в стекающей пленке и также увеличить эффективность выпарных аппаратов. Рассмотрены процессы теплообмена в стекающей пленке, взаимовлияние процессов кипения, испарения, парообразования, кристаллизации и накипеобразования. Рассмотрено влияние твердой фазы на процессы теплообмена, на повышение интенсивности процесса и увеличения эффективности выпарного аппарата.

На основе существующих теорий и сведений о процессах пленочного течения и кристаллизации разработаны модель течения пленки суспензии в выпарном аппарате со стекающей пленкой и ее математическое описание. Приведены дифференциальные уравнения, описывающие теплообмен в пленке трехфазной суспензии. Получены зависимости для инженерно-конструкторских расчетов параметров теплообмена в выпарных аппаратах со стекающей пленкой. Получено критериальное уравнение теплообмена для пленочного течения трехфазной жидкости с переменным содержанием фаз. Предложена новая методика расчета коэффициента теплоотдачи для пленочного течения трехфазной суспензии в выпарном аппарате со стекающей пленкой.

Ключевые слова: теплообмен, упаривание, парообразование, кристаллизация, выпарные аппараты со стекающей пленкой, пленочное течение, растворы солей, трехфазая суспензия.

Pavlova V.G. The regularities of heat exchange during salt solutions evaporating in evaporating device with flowing down film. – Manuscript.

Thesis for submitting of the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.17.08 – Processes and equipment of chemical technology. –National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”: Kharkov, 2007.

The thesis is devoted to researching of flow of salts solutions film with variable content of phases in evaporating devices with flowing down film. Also the possibilities of application of evaporating devices with flowing down film for salts solutions that are crystallized during an evaporating process. The method are proposed that allows to reduce scaling on the heating surface. Using this method it can be possible to decrease speed of overgrowing of heating surface and to promote the intensity of heat exchange at flowing down film and, thus, to increase the efficiency of evaporating devices. The processes of heat exchange at flowing down film are considered. The regularities of combined processes of heat exchange, evaporation, boiling and scaling in salt solution film are considered for evaporating device with flowing down film. The influence of hard phase on the heat exchange efficiency in the device is considered.

The model of film flow of salt solutions in the evaporating device with flowing down film is developed on the basis of existing theories and information about the processes of film flow and crystallizing. The differential equation, that describes a heat exchange in the film of three-phase suspension (liquid, steam and hard phases) are given. The dependences for the engineering design of heat exchange parameters in evaporating devices with flowing down film have been obtained.

The criterion equation has been proposed for describing the heat exchange processes during the film flow of three-phase liquid with variable content of phases. The new method of heat exchange coefficient calculation for three-phase suspension film has been offered.

Keywords: heat exchange, vaporization, crystallizing, evaporating devices with flowing down film, film flow, salt solutions, three-phase suspension.