

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

Естефан П’єр Ханна

УДК 661.321.3

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕПЛО- МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ  
КОНЦЕНТРУВАННЯ РОЗЧИНУ ХЛОРИДУ НАТРІЮ  
У АПАРАТІ ПРЯМОГО КОНТАКТУ**

Спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Харків – 2009**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Райко Валентина Федорівна**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
професор кафедри охорони праці та  
навколишнього середовища

**Офіційні опоненти:**

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

кандидат технічних наук, доцент  
**Лазненко Дмитро Олексійович**  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри прикладної екології,  
м. Суми

Захист відбудеться: “27” лютого 2009 р. о 10<sup>00</sup> 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 “23” січня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Тимченко В. К.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми** Підприємства хімічної промисловості для охолодження машин і робочих тіл у різних технологічних процесах споживають воду яка циркулює в оборотних циклах. Теплота в цих циклах відводиться у випарних охолоджувачах. При цьому в атмосферу йде й частина води, а з нею даремно губиться, розсіюючись разом із паром, і енергія. Солевміст оборотної води внаслідок випару росте, тому її доводиться скидати у водойми, що негативно впливає на довкілля.

У той же час значна кількість теплоти, отриманої спалюванням органічного палива, що стає все дорожчим, витрачається на концентрування технологічних рідин. Тому природним видається використання теплоти, яку необхідно відводити у виробництві, не на марний підігрів атмосфери, а на концентрування технологічних рідин. Такий процес може здійснюватися в циклах, подібних до водообігових. Концентруванню можуть піддаватися розчини будь-яких нелетких речовин. У содовому виробництві це може бути концентрування очищеного розчину хлориду натрію з одержанням твердої солі.

Треба, однак, відзначити, що конструкції існуючих випарних охолоджувачів (градирень) непридатні для проведення процесу концентрування. Вони забиваються осадами солей і виконані з матеріалів, що руйнуються в корозійноактивних середовищах. Тому основним завданням при розробці процесу випарного концентрування за рахунок вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) є створення високоефективного тепло- масообмінного апарата (градирні). Це завдання пов'язано із правильним вибором контактної пристрою й способу контактування потоків повітря й рідини, які дозволяли б тривалий час у сталому режимі працювати апарату в умовах кристалізації солі.

Таким чином, проведення досліджень тепло- масообмінних процесів, що мають метою розробку й проектування нових контактних апаратів, придатних для концентрування розчинів, зокрема хлориду натрію, і кристалізації з них солей методом випарного охолодження є актуальною науковою задачею на вирішення якої спрямовано цю дисертаційну роботу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ “ХПІ” відповідно до напрямку наукових досліджень кафедри. Здобувач провів наукові дослідження в рамках госпдоговору між НТУ “ХПІ” та ВАТ Кримський содовий завод (м. Красноперекопськ), а також договору про творчу співпрацю між НТУ “ХПІ” та Науково-дослідним і проектним інститутом основної хімії (м. Харків).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей тепло- масообмінних і гідродинамічних процесів випарного концентрування сольових розчинів за для створення перспективних апаратів, що дозволяють реалізувати процес одержання повареної солі з її очищеного розчину за рахунок ВЕР содового виробництва. Відповідно до цієї мети сформульовано й вирішено наступні задачі:

- систематизувати літературу з питань охолодження води в градирнях, теплообміну в скруберах і кристалізації солей у кристалізаторах, що охолоджуються повітрям;
- створити лабораторну установку й розробити методику розрахунку коефіцієнтів переносу ентальпії й масопередачі в процесі випарного охолодження розчину хлориду натрію, яке супроводжується кристалізацією солі;
- дослідити гідродинамічні характеристики провальних тарілок з вільним перетином 30-55 % і діаметром отворів 50-100 мм на системі насичений розчин хлориду натрію – повітря;
- дослідити залежність коефіцієнта передачі ентальпії від факторів процесу контактування нагрітого розчину й повітря на крупноперфорованих протитечійних (провальних) тарілках, виявити співвідношення опорів переносу теплоти й маси в газовій і рідкій фазах;
- перевірити технічну можливість роботи апарату в умовах кристалізації солі в процесі випарного концентрування розчину хлориду натрію;
- створити математичну модель процесу випарного охолодження розчину хлориду натрію;
- розробити практичні рекомендації для проектування тарілчастої градирні й розрахунку режиму її роботи.

*Об'єктом досліджень є процес випарного концентрування сольових розчинів з одержанням кристалічної солі.*

*Предмет дослідження – тепло- масообмінні та гідродинамічні закономірності випарного концентрування розчину хлориду натрію, зокрема в умовах кристалізації повареної солі, на крупноперфорованих протитечійних (провальних) тарілках.*

*Методи дослідження.* Теоретичні засади дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорій тепло- та масообміну між газом та рідиною. Для дослідження гідродинаміки та тепло- масообміну використано метод фізичного моделювання досліджуваного процесу на лабораторній установці. Рідини та газ у процесі експерименту аналізували із застосуванням стандартних об'ємних і вагових методів хімічного аналізу. Умови експерименту визначали з використанням математичного методу планування експерименту. Обробку результатів експерименту виконували із застосуванням комп'ютерної техніки та методів математичної статистики, Для розрахунку промислових апаратів застосовували математичне моделювання досліджуваних процесів.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

На прикладі розчину хлориду натрію, вирішено науково-технічну задачу встановлення тепло- масообмінних і гідродинамічних закономірностей процесу випарного концентрування, яке супроводжується кристалізацією солі. При цьому:

- уперше виявлено закономірності процесу переносу ентальпії і маси в системі розчин хлориду натрію – повітря на провальних тарілках і отримано рівняння для розрахунку коефіцієнта переносу ентальпії залежно від геометрич-

них характеристик контактного елемента, швидкості повітря та густини зрошення;

- уперше розроблено оригінальну методику визначення опору переносу ентальпії з боку рідини і газу і вивчено співвідношення цих опорів залежно від геометричних характеристик контактного елемента, швидкості повітря, густини зрошення та температур контактуючих фаз;

- доповнено існуючі дані про гідравлічний опір провальних тарілок, зокрема, про наявність гістерезису в залежності гідравлічного опору від швидкості повітря;

- визначено швидкість утворення відкладень солі на контактному елементі в процесі кристалізації солі, що супроводжує випарне концентрування розчину;

- розроблено уточнену математичну модель процесу випарного охолодження, що використана для цілей розрахунку апарату і режиму процесу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Одержані в роботі наукові результати мають практичне значення для розробки процесів концентрування розчинів та отримання з них солей у хімічній промисловості, зокрема у содовому виробництві.

1. Розроблено алгоритм і програму розрахунку колонного апарату, обладнаного провальними тарілками, для охолодження й концентрування розчинів у прямому контакті з повітрям, що дає змогу виконати проект такого апарату та прогнозувати результати його роботи.

2. Розроблено практичні рекомендації із проектування установок випарного охолодження розчину хлориду натрію або його випарного концентрування з одержанням твердої повареної солі, що дасть змогу підвищити техніко-економічні показники виробництва кальцинованої соди.

3. Практичні рекомендації передані до Науково-дослідного і проектного інституту основної хімії (НДІОХІМ, м. Харків) і ВАТ “Кримський содовий завод” (м. Красноперекопськ) для впровадження.

**Особистий внесок здобувача** полягає в розробці лабораторної установки й проведенні експериментальних досліджень, обробці й інтерпретації результатів дослідження, у реалізації на ЕОМ математичної моделі процесу концентрування розчину хлориду натрію в прямому контакті з повітрям і проведенні обчислювального експерименту. Брав діяльну участь у розробці практичних рекомендацій із проектування апарату для промислової реалізації процесу концентрування розчину хлориду натрію й кристалізації з нього повареної солі.

**Апробація роботи** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на IV Міжнародному семінарі “Інформаційні системи й технології” (Одеса, 2006 р.), Міжнародній конференції “Математичне моделювання, зворотні задачі й застосування” (Хмельницький, 2007 р.), VI Міжнародній конференції “Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки” (Чернівці, 2007 р.), V Міжнародному семінарі “Математичне моделювання й інформаційні технології” (Одеса, 2007 р.), XII науково-методичній конференції “Людина і навколишнє середовище – проблеми безпеки” (Одеса, 2007 р.).

первної екологічної освіти в вузах” (Одеса, 2007 р.), засіданнях науково-технічної ради НДІОХІМ (м. Харків), наукових семінарах кафедри ХТПЕ НТУ “ХПІ”.

**Публікації** За матеріалами дисертації опубліковано 8 друкованих праць, в тому числі 5 праць – у провідних фахових виданнях ВАК України.

**Структура й обсяг дисертації** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків і додатка. Повний обсяг дисертації складає 146 сторінки, з яких 33 ілюстрації по тексту, 2 ілюстрації на 2 сторінках, 11 таблиць по тексту, список використаних джерел літератури з 112 найменувань на 12 сторінках, 1 додаток на 2 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, визначено задачі дослідження, сформульовано наукову новизну й практичну цінність роботи, надано інформацію про апробацію й публікації по темі дисертації

У **першому розділі** наведено аналіз науково-технічної літератури по методах і апаратах для випарного охолодження рідин. Показано, що для випарного концентрування розчинів, яке супроводжується кристалізацією солі, перспективними є апарати зі ступінчатим контактом фаз, що обладнані провальними тарілками великого вільного перетину та з великим діаметром отворів.

Аналіз наявних у літературі даних по тепло- масообміну й гідродинаміці провальних тарілок показав, що гідродинаміка газорідинної взаємодії на провальних тарілках вивчена досить повно, однак, головним чином на системі вода – повітря. Дані про гідравлічний опір і тепло- масообмінні характеристики провальних тарілок страждають значним розкидом. З відомих методів розрахунку процесу випарного охолодження найбільший інтерес представляє метод, заснований на уяві про тепло- і масообмін як про єдиний процес переносу ентальпії, де різниця ентальпій повітря, рівноважного з рідиною, і фактично контактуючого з нею, є рушійною силою процесу випарного охолодження рідини, а його кінетика визначається наступною формулою

$$G \frac{dH_r}{dS} = k'_H (H_c - H^*), \quad (1)$$

де  $G$  – масова витрата сухого повітря, кг/с;  $S$  – міжфазна поверхня, м<sup>2</sup>;  $k'_H$  – коефіцієнт передачі ентальпії, кг/м<sup>2</sup>·с;  $H_c$ ,  $H^*$  – ентальпії повітря, що фактично контактує з рідиною, і рівноважного з нею, відповідно, кДж/кг сухого повітря.

У той же час у літературі не вдалося виявити даних для розрахунку  $k'_H$ , стосовно до провальних тарілок.

На підставі систематизації і аналізу літератури сформульовані цілі та задачі дослідження.

У **другому розділі** наведено опис лабораторної установки для проведення досліджень тепло- масообмінних і гідродинамічних характеристик провальних

тарілок, зокрема, в умовах кристалізації солі, методів роботи на ній і первинної обробки результатів експериментів.

Робота виконувалася на типовій для дослідження контактних елементів установці, що включала стенд для дослідження тарілок і системи його забезпечення рідиною й повітрям. У стенд встановлювали циліндричні царги із прозорого пластику. Діаметр і висота царг становили 0,5 м. Їх набирали в колону, а між царгами встановлювали від 3 до 5 тарілок. Конструкція стенда включала комплект приладів для виміру параметрів процесу (витрат повітря й рідини, їх температури, абсолютного тиску повітря на вході в стенд і втрати тиску в апараті).

У дослідах використовували, в основному, тарілки з діаметром отворів 65 мм і вільним перетином 42 %. Але ряд дослідів було виконано й з тарілками, що мали діаметр отворів 50 і 100 мм і вільний перетин 30 і 55 %. У дослідах варіювали швидкість повітря в діапазоні від 0,2 до 3,5 м/с, щільність зрошення – в інтервалі від 0,4 до 5 кг/м<sup>2</sup>·с. У якості модельної рідини використовували розчин повареної солі (розчин хлориду натрію). Концентрація NaCl у розсолі була 308 кг/м<sup>3</sup>, густина – 1200 кг/м<sup>3</sup>. Діапазон зміни температури розчину хлориду натрію, що подавався в установку – 25...60 °С.

За результатами дослідів обчислювали швидкість газу в повному перетині апарата, щільність зрошення й коефіцієнти передачі ентальпії і маси. Для розрахунку останніх двох показників була розроблена оригінальна методика й комп'ютерна програма. Справа в тому, що специфіка дослідження випарного охолодження полягає в необхідності вимірювання вологості і температури повітря, що надходить і виходить із досліджуваної тарілки. Виміряти ці величини у середині апарату практично неможливо. Заважають бризки рідини, причому вологість повітря змінюється уже в процесі виміру. Інша проблема, що впливає на точність виміру, – усереднення температури і складу рідини по площі тарілки. Щоб уникнути цих труднощів була розроблена методика визначення величин коефіцієнтів передачі ентальпії й маси, яка базується на вимірі витрат, вологості й температур контактуючих потоків тільки на вході й виході із лабораторного апарату.

У зв'язку зі значним об'ємом обчислювальної роботи, ця методика була реалізована у вигляді комп'ютерної програми. Програма включає математичну модель лабораторного апарату і, власне, алгоритм добору коефіцієнтів, що заснований на попередньому знаходженні температурного режиму апарату шляхом потарілкового розрахунку переносу ентальпії, і наступному визначенні кількості випареної води з використанням рівнянь масопередачі. Програма підбирає коефіцієнти передачі ентальпії й маси таким чином, щоб результати розрахунку параметрів роботи лабораторного апарату збіглися з результатами експерименту.

У **третьому розділі** описано результати експериментального дослідження, у якому виявлено закономірності тепло- масообмінних і гідродинамічних процесів випарного концентрування розчину повареної солі в апараті прямого контакту, що обладнаний провальними тарілками.

Перевірка придатності відомих даних по гідравлічному опору й гідродинамічних режимах роботи провальних тарілок до системи розчин хлориду натрію – повітря показало, що в цілому істотних розходжень між результатами дослідів із цією системою й результатами розрахунку по формулах, відомим з літератури не спостерігається. Разом з тим було знайдено, що швидкість газу, при якій наступає “захливання” апарату при використанні тарілок з вільним перетином 30-40 % нижче, ніж це впливає з літератури. Крім того, була встановлена наявність гістерезису висоти пінного шару й гідравлічного опору протитечійних тарілок. Це явище ілюструється графіком залежності гідравлічного опору провальної тарілки (вільний перетин 42 %, діаметр отворів 65 мм) від швидкості повітря, наведеним на рис.1. Стрілки на графіку показують напрямок зміни швидкості повітря.

Як видно із графіка, при плав-  
 Рис. 1. Залежність гідравлічного опору ному підвищенні витрати газу опір тарілки від швидкості повітря. тарілки нижче, ніж при його зниженні. Швидкість газу, при якій на тарілці з'являється газорідний шар при її збільшенні більше, ніж швидкість газу, при якій шар зникає при її зниженні. Очевидно, ця обставина й пояснює розкид даних, що приводять у літературі, по гідравлічному опору тарілки.

Обробкою експериментальних даних методом нелінійного оцінювання було одержано рівняння для розрахунку гідравлічного опору провальних тарілок

$$\Delta P = 0,538 w^{2,42} l^{0,53} \psi^{-3,75} d^{0,47}. \quad (2)$$

Незважаючи на відносну простоту, воно забезпечує достатню точність. Залишкова середньоквадратична помилка (СКП) розрахунку по рівнянню (2) – 9,6 % у дослідженій області зміни факторів. Показано також задовільний збіг розрахунку по рівнянню (2) з результатами інших авторів.

Відомо, що на кінетику тепло- масообміну в процесі випарного охолодження води, аналога випарного концентрування розчину хлориду натрію, впливає ряд факторів. Однак ступінь їхнього впливу різна. Можна впевнено вважати, що швидкість випару води істотно залежить від швидкості повітря в повному перетині апарата, щільності зрошення й частки вільного перетину тарілки. Що ж до значущості впливу на цей процес температури вихідного розчину хлориду натрію, температури повітря, що входить в апарат, діаметра отворів у тарілці й відстані між тарілками то були певні сумніви. Їх було перевірено в серії відсіювальних експериментів. В них встановлено, що тільки перший і третій з перерахованих факторів впливають на швидкість тепло- і масопередачі, чого не можна сказати про другий та четвертий.

В основному експерименті вивчався вплив гідродинамічних факторів, температури вихідного розчину хлориду натрію й геометрії контактного елемента на коефіцієнти передачі ентальпії й маси.

На рис.2 наведено експериментальні залежності коефіцієнтів передачі ентальпії й масопередачі від швидкості повітря в повному перетині апарата при



різних значеннях щільності зрошення. Крапки на графіках - результати експерименту, а лінії побудовані по рівняннях

$$k_H = 0,678 w^{0,89} l^{0,69} \quad \text{і} \quad k_m = 4,28 w^{0,9} l^{0,57}, \quad (3)$$

отриманих математичною обробкою результатів дослідів. У рівняннях (3) позначено:  $k_H, k_m$  – коефіцієнти передачі ентальпії й масопередачі (віднесені до поперечного перетину апарату), відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $w$  – швидкість повітря в повному перетині апарату,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $l$  – масова щільність зрошення,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Точність рівнянь (3) характеризує коефіцієнт кореляції між розрахунком і експериментом, що склав 0,98 для  $k_H$ , і 0,97 для  $k_m$ , відповідно.

а

б

Рис. 2. Залежності коефіцієнта передачі ентальпії (а) і коефіцієнта масопередачі (б) від швидкості газу при щільності зрошення ( $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ): 1 – 0,4; 2 – 0,7; 3 – 1,4; 4 – 2,6; 5 – 5.

Дослідження впливу температури розчину хлориду натрію на інтенсивність переносу ентальпії показало, що за умови росту температури від 29 до 53 °С величина  $k_H$  падає більш ніж на третину. Наприклад, для тарілок з вільним перетином 42 % коефіцієнт передачі ентальпії при зміні температури в зазначеному вище діапазоні знижується з 2,4 до 1,7  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ . Причому, з ростом температури тенденція до падіння  $k_H$  збільшується.

Настільки сильний вплив температури на коефіцієнт переносу ентальпії можна пояснити, аналізуючи рівняння залежності коефіцієнта передачі ентальпії від опорів рідинної й газової плівок, що має вигляд

$$\frac{1}{k_H} = \frac{1}{k_2} + \frac{H^* - H_i}{\alpha_{жс}(t_i - t_{жс})}, \quad (4)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт масовіддачі в газі,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі в рідині,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $t$  – температура рідини, °С; індекси  $i$  – на поверхні поділу фаз,  $жс$  – в основній масі рідини.

Оскільки  $k_2$  і  $\alpha_{жс}$  мало міняються з температурою, і їх у дослідженому інтервалі температур можна вважати постійними, то залежність  $k_H$  від  $t$  практично повністю визначається зміною з температурою відношення

$(H^* - H_i)/(t_i - t_{ж})$ . Із цього можна зробити висновок, що значимий вплив температури на коефіцієнт передачі ентальпії обумовлений тим, що опір переносу ентальпії з боку рідини становить значну частку загального опору.

Рис. 3. Кореляція між опором до передачі ентальпії й похідною від ентальпії по температурі

Ця обставина дозволила розробити методику роздільного визначення коефіцієнтів масовіддачі в газі й тепловіддачі в рідині. В умовах випарного охолодження відношення  $(H^* - H_i)/(t_i - t_{ж})$  можна дорівняти

похідній  $dH^*/dt$ , узятій при температурі основної маси рідини. Однак у такому випадку опір до передачі ентальпії  $1/k_H$  буде лінійною функцією  $dH^*/dt$  з коефіцієнтами  $1/k_2$  і  $1/\alpha_{жс}$ .

На рис. 3, представлена кореляція між  $1/k_H$  і  $dH^*/dt$ , отримана за експериментальними даними при зміні температури вихідного розчину хлориду натрію, але при постійній швидкості газу в повному перетині апарату – 0,8 м/с і щільності зрошення – 5 кг/м<sup>2</sup>·с для тарілки з вільним перетином 42 % і діаметром отворів 65 мм.

Лінія на графіку відповідає рівнянню  $1/k_H = a_0 + a_1 dH^*/dt$ , де

$$a_0 = 0,34 \pm 0,01 = 1/k_2 \quad \text{і} \quad a_1 = 0,019 \pm 0,002 = 1/\alpha_{жс} \quad (5)$$

Чисельні значення коефіцієнтів  $a_0$  і  $a_1$  отримані з використанням програми лінійного регресійного аналізу й дозволяють зі співвідношення (5) знайти значення  $k_2$  і  $\alpha_{жс}$ .

Описану вище методику знаходження  $k_2$  і  $\alpha_{жс}$  було використано у дослідженні залежності цих коефіцієнтів від гідродинамічних режимів і геометрії тарілок. Такі залежності найчастіше представляють у вигляді функціональних залежностей типу

$$k = b_0 \prod_{i=1}^n X_i^{b_i}, \quad (6)$$

де  $k$  – кінетичний коефіцієнт (коефіцієнт тепло- або масопередачі);  $X_i$  – фактор, що впливає на кінетику тепло- масообміну  $b_i$  – коефіцієнт (показник ступеня).

Очевидно, що залежність (6) шляхом логарифмування легко перетворюються до лінійного вигляду:

$$\ln k = \ln b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \ln X_i \quad (7)$$

Ця обставина дозволила звести до мінімуму обсяг експериментальної роботи обмежившись усього двома рівнями варіювання кожного з факторів. Дослідження проводилося з використанням методу планування експерименту й дозволило узагальнити результати у вигляді співвідношень

$$k_2 = 0,202 w^{0,8} l^{0,86} \Psi^{-1,8}, \quad (8)$$

$$\alpha_{ж} = 13,2w^{0,48}l^{0,47}\Psi^{-0,47}, \quad (9)$$

де Ш – частка вільного перетину тарілки м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт кореляції між розрахунком по рівнянню (8) й експериментом  $R = 0,97$ , залишкова СКП = 19 %. Ті ж характеристики для рівняння (9):  $R = 0,96$ , СКП = 15 %.

В експериментальній частині дослідження також було перевірено можливість кристалізації повареної солі в процесі випарного концентрування розчину хлориду натрію. Знайдено, що незалежно від умов проведення дослідів до 90 % кристалів, що утворюється в результаті випарного концентрування розчину хлориду натрію, мають розмір від 40 до 60 мкм.

В процесі кристалізації NaCl на поверхні тарілок і, особливо, на краях отворів утворюється щільні відкладення солі. Швидкість “обростання” тарілки відкладеннями збільшується з ростом перепаду температур на ній (різниці між температурами рідини, що поступає на й стікає з тарілки). Знайдено, що для зменшення швидкості утворення відкладень необхідно підвищувати щільність зрошення й знижувати температуру вихідного розчину хлориду натрію.

Перевірка відмивання відкладень солі на тарілках розсолем близьким до насичення (з концентрацією NaCl 5,0-5,1 мол/л) показала, що після роботи установки в режимі кристалізації протягом 16 год. на відмивання відкладень треба було 12 год.

**Четвертий розділ** присвячено розробці методики розрахунку апарату для випарного концентрування розчину хлориду натрію та її реалізації у вигляді математичної моделі, алгоритму й комп'ютерної програми.

Запропоновано метод розрахунку процесу випарного концентрування розчинів в апараті зі східчастим контактом фаз. Маючи всі переваги використання рушійної сили, вираженої в одиницях ентальпії, він додатково дозволяє досить точно оцінювати ступінь концентрування розчину за рахунок обчислення кількості води, що випарувалась. Метод заснований на попередньому знаходженні розподілу температур по тарілках, і наступному визначенні кількості випареної води з використанням рівнянь масопередачі. Такий прийом дозволив незалежно виконувати тепловий і матеріальний розрахунки.

При розробці математичної моделі прийнято наступні припущення: у межах тарілки газ рухається в режимі ідеального витиснення, а рідина – у режимі ідеального перемішування; кількість випареної рідини значно менше її загальної витрати, що дозволяє у тепловому розрахунку прийняти витрату розчину постійним по висоті апарату; тиск по висоті апарата міняється незначно й приймається постійним; масова витрата повітря і його швидкість, що віднесена до повного перетину апарату, міняються незначно й приймаються постійними по висоті апарата.

Основними рівняннями в розрахунку температурного режиму є рівняння передачі ентальпії на і-тій тарілці, яке зв'язує ентальпію газу, що надходить на тарілку, із цим параметром газу, що залишає тарілку.

$$H_i = H_i^* - \frac{H_i^* - H_{i-1}}{\exp\left(\frac{k_H S}{G}\right)}, \quad (10)$$

і рівняння теплового балансу (рівняння робочої лінії)

$$t_i = t_0 + G (H_i - H_0) / c_{ж} L, \quad (11)$$

де  $L$  – масова витрата рідини, кг/с;  $S$  – площа поперечного перерізу апарата, м<sup>2</sup>;  $i$  – номер тарілки.

Коефіцієнт передачі ентальпії  $k_H$  розраховується по формулі

$$k_H = \frac{1}{\frac{1}{k_z} + \frac{1}{\alpha_{жс}} \cdot \frac{dH}{dt}}. \quad (12)$$

Величини ж коефіцієнтів масовіддачі в газі  $k_z$  і тепловіддачі в рідині  $\alpha_{жс}$ , у свою чергу розраховуються по формулах (8) і (9), отриманими в експериментальній частині роботи.

Величина похідної  $dH/dt$  розрахована за табличним даними для залежності ентальпії водяної пари від температури з корекцією на температурну депресію розчину. Результати розрахунку апроксимовано залежністю

$$dH/dt = 0,7 + 0,0144 t + 0,00036 t^2, \quad (13)$$

де  $t$  – температура розчину хлориду натрію, °С.

Оскільки під час розрахунку протитечійного апарату частина вихідних даних (параметри рідини) задаються на верхньому його кінці, а частина (параметри повітря) – на нижньому, алгоритм теплового розрахунку передбачає ітеративну процедуру підбору температури рідини, що виходить з апарату, таким чином, щоб при потарілочному розрахунку від нижньої до верхньої тарілки вийти на задану температуру вхідної рідини. Результат теплового розрахунку – температури рідини на кожній тарілці – є основою для визначення кількості випареної в апараті води.

Особливість процесу випарного концентрування полягає в тому, що він протікає за умов помірної різниці температур повітря й рідини (5...10 °С) і істотної нерівноважності системи водяний розчин – повітря. Це дозволяє прийняти допущення про те, що випар відбувається тільки за рахунок теплоти, що акумульована рідиною, і різниця температур основної маси рідини й міжфазної поверхні визначається винятково інтенсивністю випару.

Таке припущення дозволяє на етапі матеріального розрахунку використати звичайне рівняння масопередачі між водяним розчином і повітрям.

$$x_i = x_i^* - \frac{x_i^* - x_{i-1}}{\exp\left(\frac{k_m S}{G}\right)}, \quad (14)$$

де  $g$  – маса випареної в одиницю часу води, кг/с;  $k_m$  – коефіцієнт масопредачі, кг/м<sup>2</sup>·с;

Для розрахунку  $k_m$  скористалися методикою, аналогічної до тієї, що застосовувалася для оцінки впливу температури на коефіцієнт передачі ентальпії. Вона дає наступне рівняння

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{k_c} + \frac{r}{\alpha_{жс}} \cdot \frac{d x^*}{d t}}, \quad (15)$$

де  $r$  – теплота випару води, кДж/кг.

У розрахунку похідної від вологовмісту повітря, рівноважного з розчином, по температурі ( $dx^*/dt$ ) використали ту обставину, що в інтервалі температур роботи градієнти без великої погрешності можна прийняти, що

$$\frac{d x^*}{d t} \approx \frac{0,622}{P_{общ}} \cdot \frac{d p_n^*}{d t}, \quad (16)$$

де  $P_{общ}$  – загальний тиск в апараті, МПа;  $p_n^*$  – рівноважний тиск водяної пари над розчином, МПа.

Похідну ж  $d p_n^*/dt$  розраховували по таблицях водяної пари. У результаті для знаходження  $d x^*/d t$  отримано наступне рівняння

$$\frac{d x^*}{d t} \approx \frac{3272}{273,16 + t} \frac{1}{P_{общ}} \exp\left(11,88 - \frac{5260}{273,16 + t}\right). \quad (17)$$

Повторюючи розрахунок по рівнянню (14) для кожної тарілки програма знаходить вологовміст повітря  $x_i$  на кожній тарілці, а потім кількість випаруваної на ній води

$$g_i = G(x_i - x_{i-1}), \quad (18)$$

де  $g$  – маса випареної в одиницю часу води, кг/с;  $G$  – масова витрата сухого повітря, кг/с;

Очевидно, що загальна кількість випареної в апараті води буде дорівнювати  $\sum_{i=1}^k g_i$ , де  $k$  – кількість тарілок в апараті.

Розроблена математична модель апарату для випарного концентрування розчину повареної солі може бути використана також для розрахунку концентрування будь-яких водяних розчинів нелетких речовин.

Перевірка адекватності моделі проводилася шляхом кореляції розрахункових і експериментальних даних, що стосуються температури розчину хлориду натрію на виході з апарату й маси випареної води. Установлено, що помилки розрахунку не носять систематичного характеру, а їх абсолютна величина незначна. Корекція моделі не потрібна.

У **п'ятому розділі** наведено практичні рекомендації із промислового використання результатів дисертації в содовому виробництві.

Перший напрямок практичного застосування результатів роботи пов'язаний з охолодженням розчину хлориду натрію. На південних заводах з виробництва соди в літній період розчин хлориду натрію, що є сировиною, нагрівається до 35 °С і більше. Оскільки він використовується для промивання скидних газів від аміаку, то підвищення температури призводить до збільшення втрат цього коштовного продукту. Розрахунки показують, що навіть у найбільш жаркі дні за допомогою градирні розчин хлориду натрію можна остудити на 7-9 градусів. На рис. 4 а наведено графік залежності температури охолодженого розчину хлориду натрію від температури вихідного розчину хлориду натрію, а на рис 4 б - від витрати розчину хлориду натрію. Графіки побудовані з використанням комп'ютерного моделювання.

Рис. 4. Залежності температури охолодженого розчину хлориду натрію від температури вихідного розчину хлориду натрію при його витраті 50000 м<sup>3</sup>/год (а) і від витрати в градирню розчину хлориду натрію з температурою 35 °С (б), за температури повітря 39 °С, відносної вологості 23 % і витраті повітря 50000 м<sup>3</sup>/ч.

На рис. 5 наведений ескіз градирні, спроектованої для охолодження розчину хлориду натрію. Градирня має діаметр 3 м і обладнана 5-ма провальними тарілками з вільним перетином – 40 % і діаметром отворів – 100 мм.

б  
Рис. 5. Градирня для охолодження розчину хлориду натрію.

1-5 – царги; 6 – бризковідділювач; 7 – розподільча тарілка; 8 – протитечійна тарілка

Розрахунок поглинання аміаку в промивачах газів содового виробництва показує, що за рахунок зниження температури розчину хлориду натрію можна знизити втрати аміаку зі скидними газами не менш, ніж на 40 % і тим самим забезпечити відповідне зниження забруднення навколишнього середовища.

Інший напрямок практичного використання результатів роботи пов'язано з одержанням твердої повареної солі за рахунок теплоти вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) содового виробництва шляхом випарного концентрування розчину хлориду натрію в градирні. Така сіль може бути товарним продуктом, але найбільш перспективним є її використання для зміцнення технологічних рідин, що дозволить збільшити утилізацію натрію у виробництві не менш чим на 3,5 % і відповідно скоротити, витрата сировини, обсяг стоків і витрати енергоресурсів.

На рис. 6 наведена рекомендована технологічна схема для одержання солі. Очищений розчин хлориду натрію надходить у згущувач, що обладнаний у нижній частині градирні, і звідти насосом подається у верхні холодильні царги холодильника газу кальцінації (ХГК) содового заводу. Нагрітий до 60 °С розчин хлориду натрію самопливом надходить на зрошення градирні, у якій охолоджується й концентрується.

Охолодження здійснюється за рахунок продувки повітрям, що подається вентилятором. У результаті випарювання з розчину хлориду натрію кристалізується поварена сіль. Суспензія солі збирається в ємності з конічним днищем (згущувачі), розташованій в нижній частині градирні. Згущена суспензія з нижньої частини ємності надходить на центрифугу для відділення солі. Світла охолоджена рідина з ємності знову направляється на охолодження ХГК. Відділена від маточника на центрифугі сіль подається на сушіння в барабанну сушарку, а фугат повертається в згущувач. Сіль, що пройшла сушарку, фасується й відвантажується споживачам. Отримана сіль може бути використана як харчовий продукт.

У варіанті застосування солі для зміцнення технологічних рідин відпадає необхідність у центрифугуванні й сушінні й відповідно повністю виключається використання платної теплоти. Соляна суспензія зі згущувача може безпосередньо подаватися в репульпатор на змішання з амонізованим розсолем.

В аналогічному процесі сіль може бути отримана також з дистилерної суспензії (рідкого відходу виробництва соди). Однак через більш низьку концентрацію солі, її вихід буде приблизно в 4 рази нижче, ніж при одержанні солі з розчину хлориду натрію.

Рис. 6. Принципова технологічна схема одержання твердої солі з використанням ВЕР.

Для одержання твердої солі рекомендована конструкція градирні, аналогічна наведеній на рис. 5. Відмінність полягає в меншій кількості тарілок (3 замість 5) і в згущувачі, виконаному в нижній частині градирні.

Робота установки, наведеної на рис. 6 і укомплектованої 2-ма градирнями, що забезпечують роботу одного ХГК, характеризується наступними показниками. Тепло, що утилізується в процесі одержання твердої солі – 16,3 ГДж/год (0,65 ГДж/т соди); маса випареної води – 3846 кг/год; витрата розчину хлориду натрію – 4,33 м<sup>3</sup>/год; продуктивність по солі – 1,34 т/год (53,6 кг/т соди).

Рекомендації для проектування градирень, що їх розроблено в дисертації, передано до головної організації з проектування содових підприємств – Науково-дослідного і проектного інституту загальної хімії (НДІОХІМ) для впровадження. Також ці рекомендації буде використано Красноперекоським ВАТ “Кримський содовий завод” під час реконструкції, про що є акти впровадження.

## ВИСНОВКИ

У дисертації обґрунтовано рішення науково-практичної задачі, що полягає у встановленні основних тепло- масобмінних і гідродинамічних закономірностей процесу випарного концентрування розчину хлориду натрію. Отримано наступні висновки.

1. Досліджено гідродинамічні характеристики провальних тарілок з вільним перетином 30-55 % і діаметром отворів 50-100 мм на системі насичений розчин повареної солі (розчин хлориду натрію) – повітря. Отримано рівняння для розрахунку гідравлічного опору тарілок. Уперше встановлена наявність гістерезису висоти пінного шару й гідравлічного опору протитечійних тарілок.
2. Вивчено вплив геометрії контактного елемента й гідродинамічних факторів на коефіцієнти передачі ентальпії й маси. Отримано рівняння для розрахунку коефіцієнтів передачі ентальпії й маси.
3. У процесі вивчення впливу температури на кінетику випарного концентрування розчину хлориду натрію розроблена методика роздільного визначення коефіцієнтів тепловіддачі в рідині й масоотдачі в газі. Отримано розрахункові залежності для обчислення цих коефіцієнтів залежно від швидкості газу, щільності зрошення й вільного перетину тарілки.
4. Перевірено можливість кристалізації повареної солі в процесі випарного концентрування розчину хлориду натрію. Знайдено, що незалежно від умов проведення дослідів до 90 % кристалів, що утворюються, мають розмір від 40 до 60 мкм. На поверхні тарілок і, особливо, на краях отворів утворюються щільні відкладення солі. Швидкість “обростання” тарілки відкладеннями збільшується з ростом перепаду температур на ній, причому для зменшення швидкості утворення відкладень необхідно підвищувати щільність зрошення й знижувати температуру вихідного розчину хлориду натрію.
5. Установлено, що відмивання відкладень солі на тарілках може бути проведена близьким до насичення розчином з концентрацією NaCl 5,0-5,1 моль/л. Після роботи установки в режимі кристалізації протягом 16 год на відмивання відкладень треба було витратити 12 год.
6. Розроблено математичну модель апарату для випарного концентрування розчину повареної солі, показана її адекватність експерименту. Модель може бути використана також для комп'ютерного моделювання концентрування будь-яких водних розчинів нелетких речовин. З використанням цієї моделі розроблено методику рішення зворотної задачі – знаходження коефіцієнтів передачі ентальпії й маси за результатами визначення параметрів вхідних і вихідних потоків градирні.
7. Розроблено технологічну схему та практичні рекомендації щодо проектування градирні для охолодження розчину хлориду натрію, які забезпечать зниження втрат аміаку зі скидними газами на 40 % і відповідне зниження забруднення навколишнього середовища.
8. Розроблено практичні рекомендації для проектування градирні для одержання твердої повареної солі за рахунок теплоти ВЕР содового виробництва. Рекомендований напрямок використання твердої солі – підвищення концентрації технологічних рідин, що дозволить збільшити утилізацію натрію у виробництві не менш чим на 3,5 % і відповідно скоротити, витрату сировини, енергії та обсяг стоків.
9. Практичні рекомендації передано до головної організації з проектування содових підприємств – Науково-дослідний і проектний інститут основної хімії



(НДІОХІМ) для впровадження. Основні рішення будуть використані у проєктах реконструкції на Красноперекопському ВАТ “Кримський содовий завод”, про що є акти впровадження.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Эстефан П. Х. Компьютерное моделирование водоиспарительного охлаждения растворов / П.Х. Эстефан, Л.М. Цейтлин, В.Ф. Райко // Холодильная техника и технологии. – Одесса: ОДАХ, 2006.– С. 222–226.

Здобувач розробив алгоритм роботи комп'ютерної моделі апарату для випарного концентрування розчинів

2. Математическая модель тепло- массообменного аппарата и ее использование для решения обратной задачи – нахождения кинетических характеристик переноса массы и тепла / М.А. Цейтлин, В.Ф. Райко, П.Х. Эстефана, Л.М. Цейтлин // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. - 2007 – № 1: Сер. Технічні науки. – С. 223-226.

Здобувач розробив методику ітеративного добору кінетичних коефіцієнтів та алгоритм роботи програми.

3. Эстефана П.Х. Исследование тепло и массообмена при водоиспарительном концентрировании рассола / В.Ф. Райко, П.Х. Эстефана, М.А. Цейтлин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр. -2007. – № 5/4(29). – С. 40-44.

Здобувач виконав експериментальну частину роботи та приймав участь в опрацюванні одержаних результатів.

4. Эстефана П.Х. Гидродинамические характеристики провальных тарелок с крупной перфорацией и большим свободным сечением / П.Х. Эстефана, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Вісник національного технічного університету “ХПІ”. – 2007.– № 30.– С. 78- 82.

Здобувач виконав експериментальну частину роботи та приймав участь в опрацюванні одержаних результатів.

5. Эстефана П.Х. Лимитирующие стадии переноса тепла и массы в процессе испарительного охлаждения раствора / П.Х. Эстефана, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2007.– № 4.– С. 64-69.

Здобувач виконав експериментальну частину роботи та зробив розрахунки, якими виявив стадії, що лімітують процеси масо- та теплообміну.

6. Эстефана П.Х. Оценка степени влияния различных факторов на интенсивность водоиспарительного охлаждения / П.Х. Эстефана, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки: матеріали VI міжнародної конф.– Чернівці: Зелена Буковина. – 2007. –С. 170.

Здобувач розрахував можливість та доцільність концентрування відходів дистиляції содового виробництва.

7. Эстефана П.Х. Оценка кинетических характеристик тепло- массообменных аппаратов с использованием математических моделей / П.Х. Эстефана,

В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Математическое моделирование и информационные технологии: сборник тезисов V семинара.– Одесса: ОДАХ. – 2007.– С. 66.

Здобувач розробив методику ітеративного добору кінетичних коефіцієнтів та алгоритм роботи програми.

8. Утилизация твердых отходов содового производства / Райко В.Ф., Цейтлин М.А., Шестопалов А.В. Эстефане П.Х. // Людина та навколишнє середовище – проблеми безперервної екологічної освіти в вузах: збірник наукових праць XII наук.-методичної конф. – Одеса: ОДАХ. – 2007.– С. 110.

Здобувач розраховував можливість та доцільність концентрування відходів дистиляції содового виробництва.

## АНОТАЦІЯ

**Естефан П.Х. Закономірності тепло- масообмінних процесів концентрування розчину хлориду натрію в апараті прямого контакту. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2008.

Виконано експериментальне дослідження з метою виявлення гідродинамічних закономірностей, тепло- та масопередачі в процесі випарного концентрування розчину хлориду натрію в апараті, що обладнаний провальними тарілками з часткою вільного перетину 30 – 55 % та діаметром отворів 50 – 100 мм. Вивчено вплив гідродинамічних чинників, геометрії тарілки та температури на кінетику передачі ентальпії та масопередачі.

Результати лабораторних досліджень використано у математичній моделі апарату для випарювання та охолодження сольових розчинів у прямому контакті з повітрям. Із застосуванням цих моделей розраховано промислово-дослідні апарати для охолодження або концентрування розчину хлориду натрію за рахунків вторинних енергетичних ресурсів содового виробництва. На підставі розрахунків розроблено практичні рекомендації щодо застосування цих апаратів у содовому виробництві

Ключові слова: випарювання, розчин хлориду натрію, теплопередача, масопередача, гідродинаміка, гідравлічний опір, ентальпія, утилізація тепла, контактні пристрої, провальна тарілка, охолодження, дистилерна суспензія, вторинні енергетичні ресурси.

## АННОТАЦИЯ

**Эстефан П.Х. Закономерности тепло- массообменных процессов концентрирования раствора хлорида натрия в аппарате прямого контакта. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 - процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2008.

Выполнено экспериментальное исследование с целью выявления гидродинамических закономерностей, тепло- и массопередачи в процессе испарительного концентрирования солевого раствора (на примере раствора хлорида натрия) в аппарате, оборудованном провальными тарелками с долей свободного сечения 30–55 % и диаметром отверстий 50–100 мм. Изучено влияние гидродинамических факторов, геометрии тарелки и температуры на кинетику передачи энтальпии и массопередачи.

Получено уравнение для расчета гидравлического сопротивления тарелок. Впервые установлено наличие гистерезиса высоты слоя и гидравлического сопротивления противоточных тарелок. Найдено, что два фактора: скорость газа и свободное сечение тарелки оказывают наибольшее влияние на кинетические коэффициенты. Плотность орошения влияет на них в меньшей степени, а значимое влияние диаметра отверстий в тарелке обнаружено только на коэффициент массопередачи. Получены экспериментальные функции регрессии для расчета коэффициентов передачи энтальпии и массы.

Проверена техническая возможность работы аппарата в условиях кристаллизации поваренной соли в процессе испарительного концентрирования раствора хлорида натрия. Найдено, что независимо от условий проведения опытов до 90 % образующихся кристаллов имеют размер от 40 до 60 мкм. На поверхности тарелок и, в особенности, на краях отверстий образуются плотные отложения соли. Скорость “обрастания” тарелки отложениями увеличивается с ростом перепада температур на ней, причем для уменьшения скорости образования отложений необходимо повышать плотность орошения и снижать температуру исходного раствора.

Установлено, что отмывка отложений соли на тарелках может быть проведена близким к насыщению раствором с концентрацией NaCl 5,0-5,1 моль/л. После работы установки в режиме кристаллизации в течение 16 ч на отмывку отложений потребовалось 12 ч.

Результаты лабораторных исследований использованы в математической модели аппарата для концентрирования и охлаждения солевых растворов в прямом контакте с воздухом. С применением этой модели рассчитаны опытно-промышленные аппараты для охлаждения или концентрирования раствора хлорида натрия за счет вторичных энергетических ресурсов содового производства. На основании расчетов разработаны рекомендации к применению этих аппаратов в содовом производстве.

Ключевые слова: испарение, раствор хлорида натрия, теплопередача, массопередача, гидродинамика, гидравлическое сопротивление, энтальпия, утилизация тепла, контактные устройства, провальная тарелка, охлаждение, дистиллерная суспензия, вторичные энергетические ресурсы.

## SUMMARY

**Pierre Hanna Estephane. Heat and mass exchange patterns in the process of common salt solution concentration in an apparatus of direct contact. – Manuscript.**

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

The dissertation presents an experimental study of hydrodynamics, heat and mass exchange in the process of evaporating concentration of salt solution (for example sodium chloride) in an apparatus equipped with fall-through trays with free area ratio of 30-55% and opening diameter of 50-100mm. The influence of hydrodynamic factors, tray geometry and temperature on the kinetics of enthalpy and mass transfer is considered.

The results of laboratory research are applied in a mathematical model of an apparatus for concentration and cooling of salt solution in direct contact with the air. The model allows to calculate experimental and production apparatuses for cooling or concentrating sodium chloride solutions utilizing waste energy of soda ash production. Based on these calculations, recommendations are given on applications of such apparatuses.

**Key words:** evaporation, sodium chloride solution, heat transfer, mass transfer, hydrodynamics, hydraulic resistance, enthalpy, heat utilization, contact devices, fall-through tray, cooling, brine, distiller suspense, waste energy.