

ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Новіков Павло Євгенійович

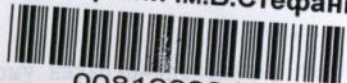
*ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В  
ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ПАНЕЛЬНОМУ  
ПЛІВКОВОМУ ВИПАРНОМУ  
АПАРАТІ ТА РОЗРОБЛЕННЯ  
ЕЛЕМЕНТІВ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ*

05.17.08—Процеси і апарати хімічної технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук

Харків-1992



00819939 (\$)

Робота виконана в Українському  
директорському інституті хімічного машинобудування  
м.Харків.

Наукові керівники: доктор технічних наук,  
чл.-кор. ІА України Перцев Леонід Петрович;  
кандидат технічних наук,  
доцент Капустенко Петро Олексійович

Провідна установа - акціонерне підприємство по проектуванню  
підприємств хімічного перероблення  
деревини "АН Мосхімдрев", м.Москва

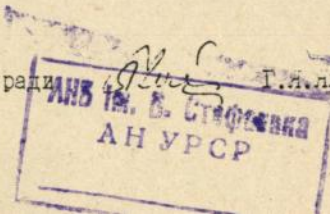
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Ткач Григорій Анатолійович;  
кандидат технічних наук, старший  
науковий співробітник  
Анохін Георгій Олексійович

Захист відбудеться "24" листопада 1992 р. в \_\_\_\_\_ г.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.39.03 в Харківсько-  
му політехнічному інституті /ЗІО002, м.Харків, ГСП, вул.Фрунзе,21/.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського  
політехнічного інституту.

Автореферат розісланий " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1992 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради \_\_\_\_\_ Т.Я.Микименко



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Термічне концентрування різних водних розчинів є основою технологічних процесів у ряді виробництв хімічної, целюлозно-паперової та інших галузей промисловості, а упарювання стоків - один з основних способів вирішення екологічної проблеми. Вимоги цих виробництв до зменшення металоемності та підвищення ефективності випарного обладнання визначають ряд задач щодо інтенсифікації теплообміну в найбільш досконалих випарних апаратах із стікаючою плівкою розчину.

Конструкція горизонтального панельного плівкового випарного апарату /ГППА/, який був розроблений вперше в Україні в ДХІММАШІ, дозволяє інтенсифікувати теплообмін у порівнянні з існуючими конструкціями плівкових апаратів шляхом використання теплообмінних елементів - панелей з тонкими стінками; плівкоутворюючих насадок, які забезпечують більш ефективно використання поверхні теплообміну; і внаслідок різкого зменшення висоти теплообмінного елемента, за допомогою чого ліквідується ділянка натікання конденсату.

У зв'язку з відсутністю у літературі достатнього обсягу наукової інформації та практичних рекомендацій для проектування та упровадження ГППА виникла необхідність у проведенні даної роботи.

Ціль та задачі роботи. Ціль роботи - дослідження теплопердачі при випарюванні різних водних розчинів у ГППА, створення методики теплового розрахунку та розробка елементів його конструкції.

Відповідно до цілі роботи визначаються задачі дослідження:

1. Визначення геометричних форм та розмірів плівкоутворюючих насадок, які дозволяють більш ефективно використовувати поверхню теплообміну.
2. Дослідження теплообмінних процесів і визначення факторів, які впливають на них, одержання теплотехнічних характеристик роботи апарату.
3. Визначення узагальнюючих залежностей для розрахунку середніх коефіцієнтів тепловіддачі від пари до стінки при плівковій конденсації водяної пари у середині панелей та тепловіддачі від стінки до плівки випарювального розчину.
4. Розробка методики теплового розрахунку і рекомендацій для промислового проектування та упровадження випарних установок

з ГША.

Наукова новина. Визначені межі початку бульбашкового кипіння у плівці водних розчинів, які стікають по зовнішніх поверхнях панелей; фактори, які впливають на теплообмін; поправочний коефіцієнт до формули Нусельта, за допомогою якого можна рахувати тепловіддачу при конденсації водяної пари у середині панелі. Одержані узагальнені залежності для розрахунку середнього коефіцієнта тепловіддачі від стінки панелі до плівки розчину при поверхньому випаровуванні та бульбашковому кипінні. Розроблена методика теплового розрахунку ГША.

Практична цінність. За результатами роботи розроблений та упроваджений керівний документ для теплового розрахунку ГША; створені й прийняті до виготовлення технічні проекти випарних установок з ГША продуктивністю від 0,5 до 250 т/год по випареній воді для підприємств хімічної та целюлозно-паперової промисловості.

Автор роботи вносить до захисту:

- результати дослідження щодо теплопередачі в експериментальному напівпромисловому ГША;
- залежності для розрахунку тепловіддачі при плівковій конденсації водяної пари у середині панелі та тепловіддачі від стінки панелі до плівки розчину; залежність для розрахунку значень питомого теплового потоку, які визначають перехід від поверхнього випаровування до бульбашкового кипіння в плівці розчину;
- методику теплового розрахунку ГША, яка рекомендується для інженерних розрахунків при промисловому проектуванні;
- результати досліджень щодо визначення геометричних форм плівкоутворюючих насадок;
- конструкцію ГША без індивідуального сепаратора.

Апробація роботи. Питання, що розглянуті в дисертації, доповідалися на VIII Всесоюзній конференції з теплообміну та гідравличного опіру в елементах енергетичних машин та апаратів /м.Санкт-Петербург, 1990 р./.

Публікації. За темою дисертації опубліковані 5 робіт. Конструкція апарата захищена авторським свідоцтвом.

Об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти глав, закінчення та додатку. Викладена на 155 стор. машинописного тексту, який містить 43 малюнка, 2 таблиці. Бібліографія містить 103 праці вітчизняних та зарубіжних авторів.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми, перелічені головні задачі дослідження, подані основні результати та положення, які виносяться на захист.

У першій главі на основі опублікованих робіт розглянуте сучасне становище питання щодо тепловіддачі від стінки теплообмінного елементу до стікаючої плівки рідини при поверхньому випаруванні та бульбашковому кипінні, а також щодо тепловіддачі від пари до стінки при плівковій конденсації водяної пари. Розглянуті сучасні конструкції плівкових випарних апаратів із стікаючою плівкою та рециркуляцією розчину. Обгрунтовані та сформульовані вищевикладені ціль та задачі даної роботи.

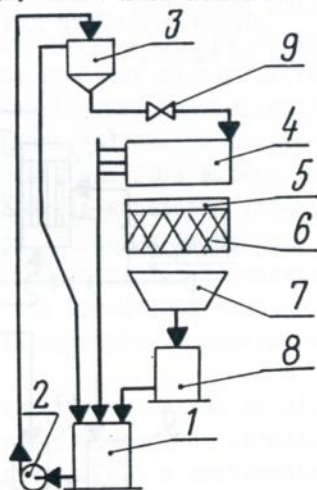
У другій главі, у першому розділі описані експериментальні дослідження з вибору геометричних форм та розмірів плівкоутворюючих насадок.

Дослідження проводились на установці, схема якої показана на мал. I. Експерименти проводились на воді. Працювала установка таким чином.

Вода зі збірника I насосом 2 через напірний бак 3 подавалась на розподільник розчину 4 і далі на насадку 5, яка установлювалась на торці теплообмінного елементу - панелі 6. Вода стікала у вигляді плівки по зовнішніх сторонах панелі й поступала у лійку 7, потім у мірний бак 8 і далі - у збірник I.

Для дослідження був прийнятий ряд насадок різної форми, які установлювались на панель та випробувались разом із розподільником розчину, який складався з напірного баку з перфорованим дном та циліндричних вставок з різними перерізами отвірів для витікання рідини.

Внаслідок досліджень вибрані геометричні форми і розміри насадок, які дозволяють ефективно формувати плівку розчину безпосередньо на насадці до моменту попадання її на поверхню панелі у діапазоні змінювання густини зрошування від 500 до 2500 кг/(м.год);



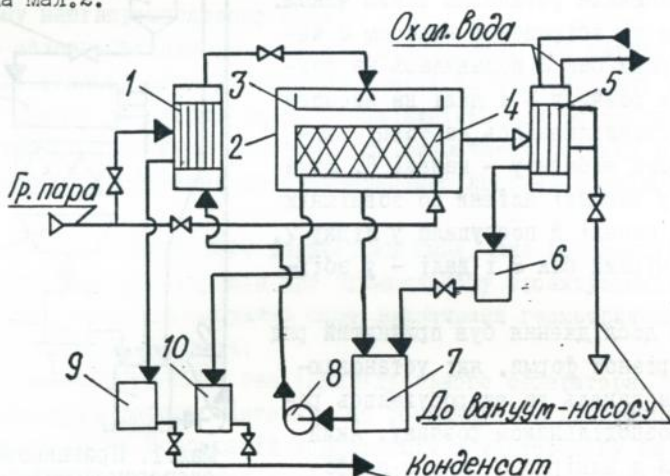
Мал. I. Принципова схема експериментальної установки для вибору плівкоутворюючих насадок

відроблена конструкція розподільника розчину. Для промислового ГПША рекомендовані: корисний гідравлічний напір в розподільнику розчину 100-120 мм, діаметри отвірив 10-12 мм, товщина днища /або висота вставок/ 10 мм, відстань від днища розподільника до насадки 15-25 мм.

У другому розділі описані експериментальний полупромисловий ГПША, схема і робота установки по дослідженню теплопередачі; викладені програма та методика дослідження.

Конструкція ГПША включала до себе циліндричний корпус, у середині якого розміщалися розподільник розчину, грійуча камера та теплообмінні елементи - панелі. Панель була виготовлена з двох листів сталі І2ХІ6НІ0Т товщиною 1 мм методом гідроформування с попереднім зваренням. Грійуча камера ГПША була складена з трьох паралельно розміщених панелей з насадками загальною поверхнею теплообміну 3,96 м<sup>2</sup>. У корпусі апарату зроблені спеціальні вікна для спостереження за течією плівки розчину по поверхні панелей.

Схема установки для дослідження теплопередачі у ГПША зображена на мал.2.



Мал.2. Принципова схема установки для дослідження теплопередачі у ГПША

Вихідний розчин з напірного баку-мішалки 7 циркуляційним насосом 8 подавався через підігрівник І, у якому нагрівався до температури кипіння, у ГПША 2 на розподільник 3. За допомогою розподільника та насадок розчин розподілявся на панелі 4. Далі, у вигляді тонкої плівки, розчин стікав, упарюючись, по зовнішніх

поверхніх панелей і поступав у донну частину ГППА і далі - у мішалку 7. Гріюча пара подавалась у середину панелей 4. Вторинна пара, створена внаслідок кипіння плівки розчину, рухалась уздовж панелей і через штуцер виводилась з апарату до поверхнього конденсатора 5, де конденсувалася. Конденсат вторинної пари поступав у мірний бак 6. Конденсат гріючої пари з ГППА з внутрішніх порожнин панелей збирався в загальний колектор і далі поступав у мірний бак 10. Витрата конденсату гріючої пари з підігрівника I вимірювалась у мірному баці 9. Вакуум у ГППА утворювався водокільцевим вакуум-насосом.

На установці проводились:

- експериментальне дослідження характеру пароутворення в плівці розчину та гідродинамічного режиму течії шляхом візуального спостереження та за допомогою фотозйомки;

- кількісне дослідження закономірностей теплообміну між гріючою парю та плівкою розчину.

У третьому, четвертому та п'ятому розділах глави подані параметри, що заміряються, та засоби вимірювання, викладена методика обробки експериментальних даних за допомогою ПЕОМ IBM PC/AT, зроблений аналіз погрішностей визначення основних характеристик дослідження процесу. Середні значення коефіцієнту тепловіддачі  $\bar{\alpha}_2$  від стінки панелі до плівки розчину визначалися шляхом вимірювання температури зовнішньої стінки панелі, яка зрошувалась розчином, за допомогою запаєних в стінку хромель-копелевих термопар з наступним осередненням температури. Значення середнього коефіцієнту тепловіддачі від пари до стінки панелі визначались посереднім методом виходжучи з попередньо визначених значень  $\bar{\alpha}_2$ , корисної різниці температур  $\Delta T$  та питомого теплового потоку  $q$ .

У третій главі подані результати експериментальних досліджень теплообміну в ГППА, викладений метод статистичної обробки експериментальних даних, зроблене порівняння ГППА з вертикальним панельним апаратом.

Експерименти проводились на воді, водних розчинах 16%-го сульфату натрію та 40%-го гліцерину при змінюванні тиску насичення вторинної пари  $P_H$  від 0,098 до 0,04 МПа, густини зрошування  $\Gamma$  від 500 до 2500 кг/м.год. ;  $q$  - від 12 до 90 кВт/м<sup>2</sup>.

Робота ГППА характеризувалась високою інтенсивністю пароутворення /мал.3/ в діапазоні змінювання  $\Delta T$ , який найчастіше використовується в промислових апаратах. Формування плівки на

зовнішніх сторонах теплообмінних елементів дозволило забезпечити високий ступінь чистоти вторинної пари. Швидкість вторинної пари в міжпанельних проходах в умовах експериментів змінювалась від 0,13

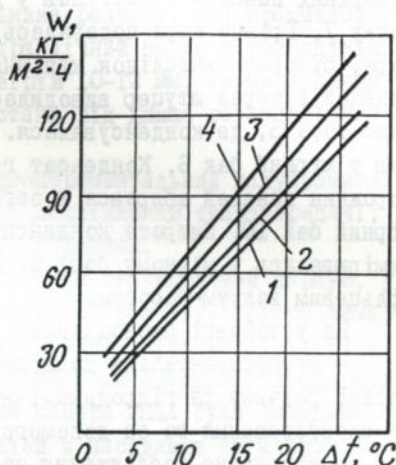
$/\rho_H = 0,098 \text{ МПа/}$  до  $1,76 \text{ м/с}$

$/\rho_H = 0,04 \text{ МПа/}$ , що обумовлювало повну відсутність впливу вторинної пари на плівку розчину. Пара, не змішуючись з розчином, рухалася вздовж панелей. Краплі розчину, частково винесені з вторинною парою під дією гравітаційних сил, падали в донну частину апарату. Апарат не був забезпечений спеціальними засобами очищення вторинної пари, але при експериментах на 16%-му розчині сульфату натрію сольовий виніс був не

більш за 10 мг/л при  $\Delta t = 18 \text{ К}$ . Дослідження характеру пароутворення в плівці дозволили визначити значення питомого теплового потоку  $q_{кр}$ , при яких відбувається перехід від поверхнього випаровування до бульбашкового кипіння. Було виявлено, що визначальними факторами змінювання  $q_{кр}$  в умовах експериментів є температура насичення вторинної пари  $t_H$  та  $\Gamma$ . Із збільшенням  $t_H$  та  $\Gamma$  бульбашкове кипіння починається при більш низьких значеннях  $q_{кр}$ .

Внаслідок експериментів визначені фактори, які впливають на тепловіддачу від гріючої пари до стінки ( $\bar{\alpha}_1$ ) та від стінки до плівки розчину. Вплив питомого теплового потоку  $q$  на  $\bar{\alpha}_2$  та  $\bar{\alpha}_1$  був виявлений таким чином. З мал.4 можна побачити, що при маленьких  $q$  при поверхньому випаровуванні  $\bar{\alpha}_2$  не залежить від  $q$ . При переході до бульбашкового кипіння спостерігається зріст  $\bar{\alpha}_2$ , обумовлений турбулізацією плівки бульбашками пари.

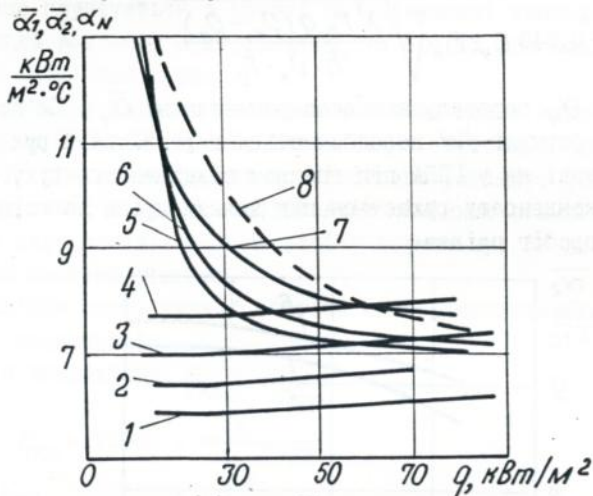
В цілому вплив  $q$  на  $\bar{\alpha}_2$  виявився незначним. При змінюванні  $q$  від 12 до 90 кВт/м<sup>2</sup>  $\bar{\alpha}_2$  змінювався на 1-6%. Через це для практичних розрахунків вплив  $q$  на  $\bar{\alpha}_2$  не ураховувався. Спостерега-



Мал.3. Залежність питомої паропродуктивності  $W$  від корисної різниці температур  $\Delta t/t_H$  - у К/:

- 1 - гліцерин,  $t_H = 373$ ;
- 2,3 - вода,  $t_H = 353$ ;
- 4 - сульфат натрію,  $t_H = 373$

лась загальна тенденція, в порівнянні з експериментами на воді, до зниження  $\bar{\alpha}_2$  при експериментах на розчині гліцерину, який мав більшу в'язкість, та зростання  $\bar{\alpha}_2$  при експериментах на розчині сульфату натрію. Певно, внаслідок локальних пересичень розчину сульфату натрію утворюються маленькі частки кристалів, які турбулізують плівку розчину.



Мал.4. Залежність  $\bar{\alpha}_1$  та  $\bar{\alpha}_2$  від  $q$  ( $\Gamma$  - у кг/(м. год.);  $t_H$  - у К);  $\bar{\alpha}_2 = f(q)$ : 1 - гліцерин,  $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 820$ ; 2, 3 - вода,  $t_H = 353$ ,  $\Gamma = 1300$ ; 4 - сульфат натрію,  $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 1300$ ;  $\bar{\alpha}_1 = f(q)$  при режимах упарювання розчинів: 5 - сульфат натрію,  $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 1300$ ; 6 - вода,  $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 1300$ ; 7 - гліцерин,  $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 1400$

Грунтуючись на теорії Нусельта плівкової конденсації водяної пари, бо в умовах експериментів на всіх режимах роботи ПША виконувалась умова використання цієї теорії:

$$\rho_{г.п.} \cdot v_{г.п.}^2 < 30 \text{ кг/(м.с}^2\text{)}, \quad /I/$$

було дане пояснення змінюванню  $\bar{\alpha}_1$  в залежності від  $q$ .

Різка падіння  $\bar{\alpha}_1$  із зростанням  $q$  /мал.4/ на ділянці поверхнього випаровування плівки розчину обумовлене зростаючою товщиною плівки конденсату та відсутністю впливу на неї гріючої пари, яка має низьку швидкість /0,2-0,7 м/с/.

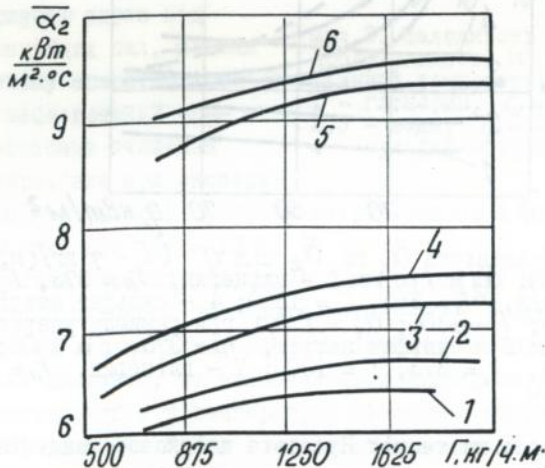
Щодалі із зростанням  $q$ , отож і швидкості пари у середині панелі /на ділянці бульбашкового кипіння плівки розчину/, спостерігалась тенденція до стабілізації  $\bar{\alpha}_1$ . Певно, у вузьких перері-

зах панелі виникала часткова турбулізація плівки конденсату під впливом пари, що приводило до інтенсифікації тепловіддачі при визначальному негативному впливі на теплообмін зростаючої товщини плівки розчину.

Характер змінювання  $\bar{\alpha}_1$  із збільшенням  $q$  сполучався з характером змінювання  $\alpha_N$ , розрахованого по теорії Нусельта:

$$\alpha_N = 0,943 \varepsilon_v \cdot \varepsilon_r \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \Gamma_K g (\rho_K - \rho_a)}{h \cdot \nu_K \cdot t_2}}, \quad (2)$$

але значення  $\alpha_N$  перевищували експериментальні  $\bar{\alpha}_1$ . Це пояснюється тим, що у формулі /2/ передбачається вертикальний рух плівки конденсату, тоді як у ГППА під впливом поздоєжнього руху гріючої пари плівка конденсату рухається під деяким кутом до горизонту, що збільшує пробіг плівки.



Мал.5. Залежність  $\bar{\alpha}_2$  від густини зрошування  $\Gamma$  /  $t_H$ ,  $\Delta t$  - у К/: 1 - гліцерин,  $t_H = 373$ ,  $\Delta t = 18$ ; 2 - вода,  $t_H = 361$ ,  $\Delta t = 11$ ; 3, 4 - вода,  $t_H = 373$ ;  $\Delta t = 5$ ; 10; 5, 6 - сульфат натрію,  $t_H = 373$ ,  $\Delta t = 5, 7$ ; 13

Був виявлений позитивний вплив на  $\bar{\alpha}_2$  збільшення густини зрошування  $\Gamma$  /мал.5/. Але при досягненні граничних значень  $\Gamma = 1300-1600$  кг/(м.год.) /в залежності від умов експерименту/ подальший зріст  $\Gamma$  не впливав на  $\bar{\alpha}_2$ . Це пояснюється тим, що плівка мала різну товщину, обумовлену поверхнею теплообміну, яка мала западини та випуклості. При зростанні  $\Gamma$  вище указаних значень спостерігався частковий перехід до струмкової течії плівки у западинах панелі, де утворювались застійні зони, з одночасною

інтенсифікацією теплообміну на випуклощах поверхні панелі. Певно, на граничні значення  $\Gamma$  впливають геометричні форми панелі. Через це подальші дослідження теплопередачі при  $\Gamma$  більш за 1600 кг/(м.год.) не проводились.

Був виявлений позитивний вплив збільшування тиску насичення вторинної пари  $\rho_H$  на  $\bar{\alpha}_2$  на всіх режимах роботи ПТЩА. Пояснення цього явища ґрунтується в роботі на змінюванні теплофізичних властивостей розчинів при різних  $\rho_H$  та теорії про швидкість зростання бульбашки пари.

Статистична обробка експериментальних даних виконувалась за допомогою ПЕОМ IBM PC/AT. Математична обробка об'єднувала 3 етапи: 1/ зведення рівнянь до лінійного вигляду, утворення перерозподіленої матриці коефіцієнтів лінійних рівнянь; 2/ перетворення перерозподіленої матриці у нормальну; 3/ розв'язання нормальної системи рівнянь.

Внаслідок статистичної обробки експериментальних даних одержані такі залежності:

- для розрахунку  $q_{кр}$ :

$$q_{кр} = 75569 \cdot \frac{\Gamma^{0,197}}{t_H^{0,587}} \quad 13/$$

/  $t_H$  - у  $^{\circ}\text{C}$ /;

- для розрахунку  $\bar{\alpha}_2$  при поверхньому випаровуванні ( $q < q_{кр}$ ):

$$\bar{\alpha}_2 = 2827,62 \cdot \Gamma^{0,132} \cdot \rho_H^{0,33} \quad 14/$$

/  $\rho_H$  - у барах/;

- для розрахунку  $\bar{\alpha}_2$  при бульбашковому кипінні, яке найчастіше зустрічається в промисловості ( $q \geq q_{кр}$ ):

$$Nu^* = 1,85673 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{0,227} \cdot K_p^{0,337} \cdot Pr^{0,18}; \quad 15/$$

$$\bar{\alpha}_2 = Nu^* \cdot \lambda \left( \frac{\nu}{g} \right)^{-1/3}; \quad 16/$$

- для розрахунку  $\bar{\alpha}_1$ :

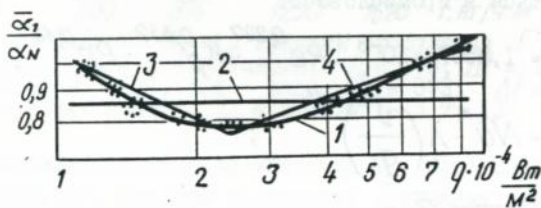
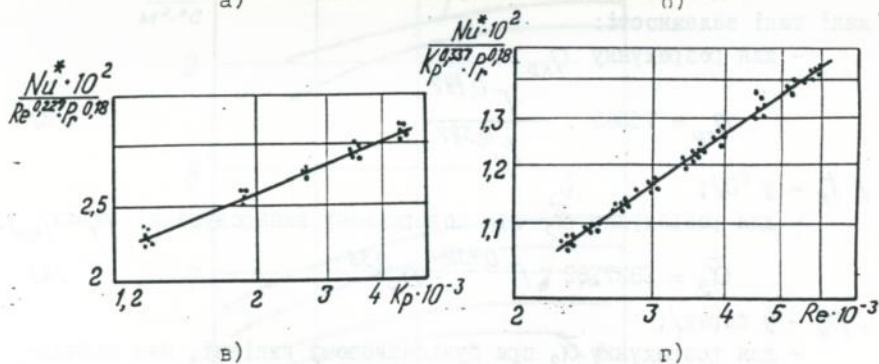
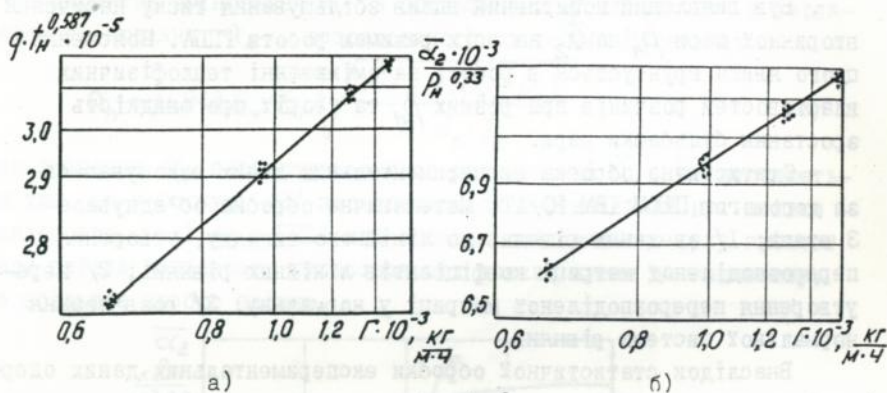
без урахування впливу питомого теплового потоку

$$\bar{\alpha}_1 = 0,8475 \alpha_N = 0,8475 \varepsilon_v \cdot \varepsilon_r \cdot 0,943 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \Gamma g (\rho_k - \rho_H)}{h \cdot \nu_k \cdot t_2}}; \quad 17/$$

з урахуванням впливу питомого теплового потоку

$$\bar{\alpha}_1 = c \cdot \alpha_N, \quad 18/$$

де  $C = 1,20568 - 2,0655 \cdot 10^{-5} q$  при  $q \leq 23000 \text{ Вт/м}^2$ ; /9/  
 $C = 0,703454 + 3,09789 \cdot 10^{-6} q$  при  $q > 23000 \text{ Вт/м}^2$ . /10/  
 На мал.6 подане узагальнення експериментальних даних.

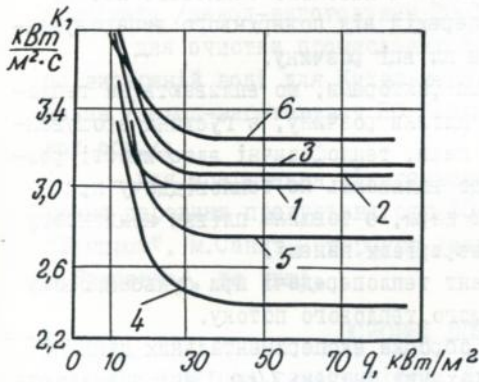


Мал.6. Узагальнення експериментальних даних залежностями  
 / • - експеримент; а/ - /3/; б/ - /4/; в, г/ - /5/;  
 д/ тут: 1 - експеримент, 2 - /7/, 3, 4 - /8/

Використання узагальнених залежностей обмежується діапазонами змінювання таких параметрів:

$\Gamma = 500-1600$  кг/(м.год.);  $\rho_H = 0,04-0,1$  МПа;  $q = 12-90$  кВт/м<sup>2</sup>;  
 $\rho_{\Gamma} = 1,5-7,0$ ; товщина стінки панелі 1 мм.

На мал.7 подана залежність коефіцієнту теплопередачі  $K$  від  $q$ . З малюнка можна бачити, що на ділянці поверхнього випаровування, коли  $\bar{\alpha}_2$  не був залежний від  $q$ , характер змінювання  $K$  сполучається з характером змінювання  $\bar{\alpha}_1$ , але при бульбашковому кипінні  $K$  не залежить від  $q$ . Це пояснюється тим, що при близьких значеннях  $\bar{\alpha}_1$  і  $\bar{\alpha}_2$  та малому впливі  $q$  на тепловіддачу зменшення  $\bar{\alpha}_1$  із збільшенням  $q$  супроводжується збільшенням  $\bar{\alpha}_2$ , й навпаки, що і дозволяє значенням  $K$  бути на одному рівні. Ця особливість роботи ГППА дозволяє зберегти високу інтенсивність теплообмінних процесів у



Мал.7. Залежність  $K$  від  $q$   
 $t_H$  - у К,  $\Gamma$  - у кг/(м.год.):  
 1, 2, 3 - вода,  $t_H = 373$ ;  $\Gamma = 650$ ,  
 990, 1300; 4 - вода,  $t_H = 348$ ,  
 $\Gamma = 1600$ ; 5 - гліцерин,  
 $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 820$ ; 6 - сульфат  
 натрію,  $t_H = 373$ ,  $\Gamma = 1500$

промислових апаратах при значних коливаннях теплового навантаження.

У кінці глави подається порівняння ГППА з попередньо дослідженим вертикальним панельним апаратом, яке показало, що інтенсивність теплообміну в ГППА збільшилась на 15-20%.

У четвертій главі викладена методика теплового розрахунку ГППА, яка створена на основі одержаних емпіричних залежностей.

У п'ятій главі подане промислове використання результатів дослідження, покладених в основу створення випарних установок із ГППА продуктивністю від 0,5 до 250 т/год. по випареній воді для підприємств хімічної та целюлозно-паперової промисловості. Подані: промисловий ГППА для упарювання чорного сульфатного луґу з поверхнею 1600 м<sup>2</sup>; технологічні схеми установок із ГППА для упарювання відпрацьованого луґу киснево-содового варення деревини продуктивністю 20 т/год. по випареній воді та установки для упарювання промислових стоків продуктивністю 0,5 т/год. по випареній

воді. Зроблено техніко-економічне обґрунтування використання установок із ГППА в порівнянні з існуючими вертикальними конструкціями плівкових випарних апаратів.

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Визначені критичні значення питомого теплового потоку  $q_{кр}$ , при яких здійснюється перехід від поверхнього випаровування до бульбашкового кипіння в плівці розчину.
2. Виявлено, що основними факторами, що впливають на тепловіддачу від стінки панелі до плівки розчину, є густина зрошування, тиск насичення вторинної пари, теплофізичні властивості розчинів. Основними факторами, що впливають на тепловіддачу при плівковій конденсації водяної пари, є товщина плівки конденсату та швидкість пари у вузьких перерізах панелі.
3. Виявлено, що коефіцієнт теплопередачі при бульбашковому кипінні не залежить від питомого теплового потоку.
4. Виконана статистична обробка експериментальних даних і одержані залежності: для розрахунку значень  $q_{кр}$ , які визначають межу початку бульбашкового кипіння /3/; для розрахунку при поверхньому випаровуванні /4/ і бульбашковому кипінні /5/; визначений поправочний коефіцієнт до теорії Нусельта, за допомогою якого можна рахувати  $\alpha_1$  /7/.
5. Створена методика теплового розрахунку ГППА, на основі якої розроблений та упроваджений керівний документ для теплового розрахунку ГППА.
6. Виявлено, що формування гравітаційної плівки розчину на зовнішніх сторонах панелі забезпечує високий ступінь чистоти вторинної пари, внаслідок чого конструкції ГППА не потрібний індивідуальний сепаратор для очистки вторинної пари.
7. Визначені конструкція та розміри розподільника розчину та геометричні форми плівкоутворюючих насадок, які дозволяють ефективно використовувати всю поверхню теплообміну при стіканні плівки.
8. Виявлено, що ГППА ефективніший на 30-40% за трубчаті випарні апарати зі стікаючою плівкою та на 15-20% - за вертикальні панельні; застосування ГППА замість вертикальних трубчатих апаратів у промисловості дозволить зменшити металоємність та габаритні розміри установок. Конструкція ГППА має великі можливості для уніфікації.

9. ГППА застосовується як основне обладнання у технічних проектах випарних установок продуктивністю від 0,5 до 250 т/год. по випареній воді для різних галузей промисловості. Нині по цим проектам виготовляються випарні установки:

- для упарювання чорного сульфатного лугу продуктивністю 250 т/год. по випареній воді для Котласького целюлозно-паперового комбінату /завод-виготовувач ПО "Рузхіммаш", м.Рузаєвка/;

- для очистки промислових стоків продуктивністю 0,5 т/год. по випареній воді для Київського авіаційно-промислового об'єднання /завод-виготовувач ПО "Сніжнянськхіммаш", м.Сніжне Донецької обл./;

- для упарювання відпрацьованого лугу киснево-содового варення деревини продуктивністю 20 т/год. по випареній воді для ПО "Бумпром", м.Санкт-Петербург /завод-виготовувач ПО "Рузхіммаш", м.Рузаєвка/, та інші.

#### ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$C$  - питома теплоємність, Дж/(кг.К);

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$h$  - висота теплообмінного елемента, м;

$K$  - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>.К);

$P_H$  - тиск насичення вторинної пари, МПа;

$\Gamma$  - питома теплота фазового перетворення, Дж/кг;

$\Delta t$  - корисна різниця температур, К;

$t_2$  - частковий температурний напір, К;

$q$  - питомий тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;

$W$  - питома паропроductивність, кг/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м.К);

$\Gamma$  - густина зрошування, кг/(м.год.);

$\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, Па.с;

$\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;

$\bar{\alpha}$  - середній коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>.К);

$\sigma$  - поверхневий натяг, Н/м;

$\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;

$Re = 4 \cdot \Gamma / \mu$  - критерій Рейнольдса плівкової течії;

$Pr = c \cdot \mu / \lambda$  - критерій Прандтля;

$Nu^* = \frac{\bar{\alpha}_2}{\lambda} \left( \frac{\nu^2}{g} \right)^{1/3}$  - критерій Нусельта модифікований;

$$K_p = \frac{P_n \cdot l}{\sigma} \quad - \text{критерій тиску};$$

$$l = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_p - \rho_n) g}} \quad - \text{постійна Лапласа, м.}$$

Індекси: 1 - належить до стінки панелі зі сторони грійочої пари; 2 - належить до стінки панелі зі сторони плівки розчину; к - конденсат; кр. - критичний; н - насичення вторинної пари; п - пара; р. - рідина; ч - частковий.

По темі дисертації опубліковані такі роботи:

1. Перцев Л.П., Новиков Е.П., Капустенко П.А., Новиков П.Е. Новый тип горизонтально-пленочного выпарного аппарата с панельными поверхностями теплообмена для упаривания различных растворов // Тез. докл. на УШ Всесоюзній конф. "Двофазний потік в енергетичних машинах та апаратах" 23-25 жовтня 1990 р. - Л.: НПО ЦКТИ, 1990.

2. РД 26.260.002-91. Аппараты выпарные с гравитационно-стекающей пленкой и рециркуляцией раствора. Метод теплового и гидродинамического расчетов / П.Е.Новиков, Л.П.Перцев, Е.П.Новиков. - Харків: УкрДіхіммаш, 1991.

3. А.с. 4332020/26. Пленочный выпарной аппарат / П.Е.Новиков, Л.П.Перцев, Е.П.Новиков. - 29.08.91.

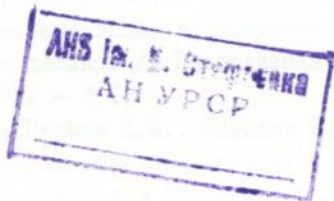
4. Новиков П.Е., Перцев Л.П., Новиков Е.П. Определение плотности орошения в пленочных выпарных аппаратах при концентрировании черных сульфатных щелоков // Гидролизная и лесохимическая промышленность. - 1992. - № 1.

5. Новиков П.Е., Перцев Л.П., Новиков Е.П. Интенсификация теплопередачи в пленочных выпарных аппаратах целлюлозно-бумажной промышленности // Гидролизная и лесохимическая промышленность. - 1992. - № 3.

6. Перцев Л.П., Новиков П.Е., Капустенко П.А., Новиков Е.П. Интенсификация теплопередачи в пленочных выпарных аппаратах // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1992. - № 8.

Ноб





Підписано до друку 28.10.92.

Зам. № 4211

Тираж 100 прим.

ЕРА УкрНДІхіммашу, м.Харків, вул.Маршала Конєва, 21

469050

AB 26.196

**AB 26.196**