

АВТОРЕФ  
Т 45

ОДЕСЬКИМ ІНСТИТУТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

На правах рукопису

ТІТАРЕНКО Тетяна Василівна

ГІДРОДИНАМІКА І ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОС ПРИ ВИПАРНОМУ  
ОХОЛОДЖЕННІ РІДИН У ПЛІВКОВИХ ВЕНТИЛЯТОРНИХ ГРАДИРНЯХ

Спеціальність 05.14.05 - Теоретичні основи теплотехніки

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата  
технічних наук

xv 1013

ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

Одеса - 1994

Робота виконана в Одеському інституті низькотемпературної техніки та енергетики

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук,  
доцент  
В.Х. Кирилов.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
Г.Ф. Смирнов,  
кандидат фізико-математичних наук,  
доцент  
О.С. Голіпський.

Провідна організація - Інженерно-технологічний інститут  
"Біотехніка" УАН, м.Одеса.

Захист відбудеться 26 04 1994 р. у 11 годин  
на засіданні спеціалізованої ради К.068.27.01 при Одеському  
інституті низькотемпературної техніки та енергетики за адресою:  
270100, м. Одеса, вул.Петра Великого 1/3, ОНТЕ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту

Автореферат розісланий 21 03 1994 р.

секретар

Р.К. Нікульшин

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Плівкові тепломасообмінні апарати знайшли широке застосування у холодильній техніці і при кондиціонуванні повітря, в хімічній технології і харчовій промисловості. Створення і удосконалення апаратів такого типу неможливе без докладного вивчення гідродинаміки та процесів переносу тепла і маси, які відбуваються під час взаємодії теплоносіїв. Дослідження гідродинаміки плівкового стікання присвячено багато робіт, але більшість з них здійснено для стікання по гладким поверхням. Аналіз небагатьох літературних даних вивчення характеристик плівкового стікання по поверхням з регулярною шорсткістю, яка значно інтенсифікує процеси ТМО, приводить до висновку, що результати мають неповний, розрізнений, а іноді й суперечний характер. Існуючі методи розрахунку процесів ТМО мають різні припущення, які не відповідають уявленням про фізичні закономірності цих процесів і вимагають притягнення дослідних даних для коефіцієнтів сумісного тепломасообміну. Крім того, ці методи не дозволяють вивчити внески складових процесів переносу, які проходять, в цілому кажучи, сумісно. Таким чином, існує необхідність подальшого як експериментального так і теоретичного вивчення гідродинаміки плівкового стікання і тепломасообміну в апаратах плівкового типу. Крім того, в інженерній практиці відсутній метод комплексного розрахунку плівкових апаратів, який враховує взаємозв'язок енергетичних, гідравлічних і тепломасообмінних характеристик і дозволяє прогнозувати робочі характеристики в різних умовах експлуатації.

Мета роботи і завдання дослідження. Розробка теоретичних основ розрахунку гідродинаміки та тепломасообмінних процесів з метою створення інженерної методики проектування ефективної плівкової тепломасообмінної апаратури випарного охолодження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі проблеми:

- провести теоретичне дослідження крупномасштабних збурень, які поширюються по поверхні плівки рідини, яка тече по гладких та шорстких насадкових елементах тепломасообмінних апаратів в умовах слабкої взаємодії з газовим потоком;
- експериментально, методом локальної електропровідності, визначити середню товщину плівки рідини на поверхнях різної конфігурації;
- розробити модель стікання плівки рідини по вертикальній поверхні з регулярною шорсткістю при взаємодії з потоком газу;
- провести дослідження плівко-струминного стікання рідини по за-

паднині поздовжнього гофрованої поверхні з регулярною шорсткістю;  
 - розробити методику розрахунку процесів тепло- і масообміну при випарному охолодженні рідини в контактному пристрої ТМА;  
 - визначити турбулентні коефіцієнти переносу на підставі теоретичних та експериментальних даних;  
 - створити інженерну методику проектування проти- і поперечнотечійних градирень.

Робота виконувалась у ПНДІ з холодильної техніки Одеського інституту низькотемпературної техніки та енергетики і включає результати держбюджетних НДР № 055.04 і 055.05 та госдоговірних НДР № 91094, 92092, 92093.

Основні наукові результати. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше:

1. В нелінійній постановці на основі чисельного розв'язання нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса проведено дослідження еволюції початкового збурення на поверхні тонкого шару рідини, що стікає вертикально. Установлено існування на поверхні рідини крупномасштабних хвилеутворень - солітонів - з амплітудою порядку кількох товщин плівки, які переміщуються в напрямку руху рідини. При взаємодії з виступами шорсткості хвилі збурення (солітони) руйнуються і на поверхні плівки формуються стоячі хвилі, які повторюють рельєф шорсткості.

2. На основі рівнянь Нав'є-Стокса у постановці Прайдтля методом Кармана-Польгаузена розроблено математичну модель стікання плівки рідини по поверхні з РШ. В результаті встановлено, що в разі малої висоти виступів РШ хвильовий режим є суперпозицією прогресивних і стоячих хвиль. Методом Фур'є отримані профіль стоячої хвилі та її основні характеристики для випадку малої висоти виступу шорсткості. Для великої висоти виступу здійснено чисельне дослідження. Встановлено, що в такому разі переважними є стоячі хвилі; вони повторюють профіль регулярної шорсткості.

3. Експериментально і теоретично встановлено, що для значень параметрів РШ  $\epsilon = 0,5 - 1$  мм і  $k = 8 - 12$  при еквівалентному діаметрі каналів насадкового шару  $d_s = 10 - 16$  мм існує режим стікання плівки з регулярно-хвильовою структурою її поверхні (стоячі хвилі), практично відсутня початкова ділянка формування хвиль, бризкоутворення мінімальне, тобто мають місце оптимальні умови виявлення регулярної шорсткості, які забезпечують максимальну інтенсифікацію процесів переносу в газовій фазі.

4. На основі рівняння балансу сил, які діють на елемент тон-

кого шару рідини, отримані залежності для обчислення середньої товщини плівки, а також коефіцієнтів гідравлічного опору при двофазному плівковому стіканні по поверхнях різної конфігурації (плоска та гофрована гладка і з РШ).

5. Проведено експериментальне дослідження двофазного плівкового стікання рідини і методом локальної електропровідності на одноканальній моделі визначено середню товщину плівки при стіканні по плоскій та гофрованій гладкій та шорсткій поверхнях. Експериментальні дані представлені у вигляді апроксимаційних залежностей для середньої товщини плівки рідини.

6. На основі експериментальних даних і розв'язування рівнянь конвективного тепломасообміну розроблено ітераційний метод розрахунку турбулентних коефіцієнтів в'язкості, теплопровідності і дифузії для газу. Отримано двовимірний розподіл температур та парціального тиску пари у двофазній системі. Для різних типів насадок установлено аналогію процесів переносу тепла і маси; при цьому співвідношення Льюїса змінюється у межах від 0,95 до 1,25.

7. Розроблено інженерну методику розрахунку проти- і поперечнотечійних вентиляторних градирень, яка включає взаємозв'язаний розрахунок всіх вузлів апаратів та вибір вентиляторів.

Наукові положення, які захищаються в роботі.

1. При стіканні тонкого шару в'язкої рідини уздовж вертикальної поверхні з РШ, висота виступів якої сумірна із середньою товщиною плівки, великомасштабні хвилеутворення (солітони) руйнуються внаслідок дифракції хвиль на виступах РШ. На поверхні плівки формуються стоячі хвилі з амплітудою порядку висоти виступів РШ.

2. Математична модель процесів випарного охолодження, яка враховує турбулентні коефіцієнти переносу, є основою інженерної методики розрахунку плівкової тепломасообмінної апаратури.

Практична цінність роботи. На основі розроблених методів розрахунку гідродинаміки і тепломасообмінних процесів у двофазних системах отримані розрахункові залежності для основних характеристик потоків, необхідні при проектуванні ТМА. Розроблено і впроваджено до інженерної практики методику розрахунку проти- і поперечнотечійних вентиляторних градирень.

Реалізація результатів досліджень. Результати досліджень були використані при проектуванні поперечнотечійної градирні з регулярною насадкою на Симферопольському дослідно-експериментальному заводі нестандартизованого обладнання, при розробці тепломасообмінної апаратури, яка виробляється на ВО "Екватор" у м.Мико-

лаєві та при розробці типорозмірного ряду градієнь для підприємств АПК в НВО "Агрохолодпром".

**Апробація роботи.** Результати роботи були приведені на 8 конференціях і семінарах, в тому числі у 1981 р. на Всесоюзному семінарі "Використання досягнень холодильної техніки і технології з метою підвищення ефективності харчових виробництв", у 1987 р. на Всесоюзній науково-практичній конференції "Штучний холод у галузях агропромислового комплексу", у 1989 р. на Всесоюзній науково-технічній конференції "Створення і впровадження сучасних апаратів з активними гідродинамічними режимами для текстильної промисловості і виробництва хімічних волокон", у 1989 р. на Всесоюзній конференції "Шляхи інтенсифікації виробництва із застосуванням штучного холоду", в 1990 р. на Всесоюзній конференції "Двофазний потік у енергетичних машинах і апаратах".

За темою дисертації опубліковано 18 друкованих праць.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, основних підсумків, списку використаної літератури, який включає 181 найменування та додатків. Основний зміст роботи викладений на 174 аркушах машинописного тексту, включає 46 рисунків та 13 таблиць.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи і практичне значення.

У першій главі на основі проведеного аналізу відомих літературних даних по вивченню гідродинаміки і тепломасопереносу в апаратах плівкового типу сформульовано мету роботи і завдання дослідження.

У другій главі на основі рівнянь Нав'є-Стокса і рівнянь нерозривності

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \nu_x \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + \nu_x \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + g \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

з граничними умовами у довгохвильовому наближенні

$$v_x = v_z = 0 \quad \text{при } x = f(z) \quad (4)$$

$$v_x = \frac{\partial h}{\partial t} + v_z \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} = \tau_r; \quad P = P_r - \sigma \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad \text{при } x = h(z, t) \quad (5)$$

було проведено дослідження еволюції початкових та вхідних збурень плівки рідини, яка стікає по плоских, гладких і шерстких листах в разі слабкої взаємодії фаз ( $v_r \ll 3$  м/с,  $\tau_r \approx 0$ ). Для цього криволінійна область течії з невідомою границею зводилась до прямокутника  $0 \leq \xi \leq H$ ,  $0 \leq \eta \leq 1$  ( $H$  - довжина робочої поверхні апарата) за допомогою перетворення Ляндау  $\tau = t$ ,  $\xi = z$ ,  $\eta = (x-f)/(h-f)$ . У нових координатах отримані рівняння в наближенні пограничного шару апроксимувались неявною чотириточковою різницевою схемою з ітераціями по нелінійності і вирішувались чисельно методом прогонки. Початкове збурення мало синусоїдальний профіль з довжиною хвилі  $\lambda = 4$  мм, 10 мм та 25 мм. В усіх випадках виникають крупномасштабні хвилювання - солітони - з амплітудою порядку кількох товщин плівки, котрі пересуваються вниз по листу. У випадку шерсткості поверхні солітонні хвилювання накладаються на стоячі хвилі, які відповідають профілю шерсткості. Встановлено, що велика висота виступів шерсткості ( $e \geq \delta$ ) призводить до руйнування солітонів. На рис.1 наведені результати розрахунків конфігурації поверхні плівки на гладкому листі.

Далі у другій главі досліджується профіль поверхні плівки в разі її усталеного стікання по поверхні з регулярною шерсткістю. У постановці Прандтля вихідна задача (1)-(5) методом Кармана-Польгаузена зводиться до диференціального рівняння третього порядку відносно шуканого профілю вільної поверхні  $h(t, z)$ . Розв'язок цього рівняння шукаємо у вигляді суперпозиції прогресивних  $h_0$  та стоячих  $h_1$  хвиль  $h_0(t, z) + h_1(z)$ . Для стаціонарного режиму, коли  $h = h_1(x, z)$ , товщина шару рідини  $\delta = h_1 - f$  визначається з рівняння

$$\delta^3 \delta'''' + \frac{6}{5} We \left( 1 - \frac{2\tau \delta^2 + \tau^2 \delta^4}{48} \right) \delta' + \frac{3We}{aRe} \delta^3 + \epsilon f'' \delta^3 - \frac{3We}{aRe} \left( 1 - \frac{\tau \delta^2}{2} \right) = 0.$$

Якщо висота виступу шерсткості менша за товщину плівки ( $e/\delta_N = \epsilon \ll 1$ ), задача розв'язується в межах квазілінійної теорії. Результат знаходиться у вигляді ряду  $\delta = 1-f + \sum_{k=1}^{\infty} \delta_k \epsilon^k$ , де  $f = \epsilon f_1(z)$ . Послідовні наближення  $\delta_k$  отримані за методом Фур'є. Коли  $\epsilon \geq 1$  проводиться чисельний аналіз методом Кутта-Марсона. Встановлено, що в разі малої висоти виступу РШ хвильовий режим представляється суперпозицією прогресивних і стоячих хвиль, а при великій висоті

виступів ( $\epsilon \geq 1$ ) переважними є стоячі хвилі; вони повторюють профіль регулярної шорсткості. Для обох випадків отримані розрахункові співвідношення для амплітуди стоячої хвилі і для середньої товщини плівки рідини, необхідні в подальшому при розрахунку процесів ТМО.

На основі рівняння балансу сил, які діють на елемент тонкого шару рідини, що стікає по поверхні з РШ,

$$\rho_x S_x g = \lambda_x P_{сн} \rho_x v_x^2 / 8 + \lambda_r P_m \rho_r v_r^2 / 8 \quad (6)$$

і експериментальних даних по коефіцієнтах опору вирішується проблема обчислення максимальної товщини плівки рідини при струминно-плівковому стіканні вздовж гофрованої поверхні. Для цього рівняння (6) зводиться до вигляду

$$\Delta^3 = 5,51 \lambda_x b^5 G_x^2 \left[ \ln \left( \Delta + \sqrt{1 + \Delta^2} \right) + \Delta \sqrt{1 + \Delta^2} \right] \quad (7)$$

де  $\Delta = 2(b\delta_{max})^{1/2}$ ,  $b = 8E^2/P$ , і чисельно вирішується відносно  $\delta_{max}$ .

В експериментальній частині другої глави описані дослідження двофазного потоку, які проводилися на вертикальних плоских та позовжньо-гофрованих листах в одноканальній моделі. Методом електропровідності вимірювалась товщина плівки рідини; крім того, в серії досліджень тепломасообміну вимірювались температури потоків та вологовміст на вході та виході з одиночного каналу.

На рис.2 приведені результати вимірювань середньої товщини плівки, отримані на листі з регулярною шорсткістю типу "виступ" (крива 1), на листі з шорсткістю синусоїдального профілю (крива 2) і на гладкому листі (крива 3). Значення  $p$  і  $e$  порівнюваних листів з шорсткістю приблизно однакові і  $k = p/e = 8$ . Вид залежності  $\delta = f(Re)$  дозволяє віддати перевагу шорсткості типу "періодичний виступ" з гладким профілем, який забезпечує більш сприятливі умови інтенсифікації процесів переносу як у рідині так і в газі. З цих міркувань для гофрованих насадкових листів формувалась регулярна шорсткість типу "виступ".

Результати вимірювань середньої товщини плівки представлені у вигляді апроксимаційних залежностей. Для гофрованих листів з РШ отримані вирази

$$\delta_{max} = 1980 \sqrt[3]{\frac{3v_x^2}{4g}} Re_x^{0,404} k^{-0,591} \exp(1,44 \cdot 10^{-2} k) \left( \frac{P}{2E} \right)^{0,549} \quad (8)$$

для ламінарного режиму стікання плівки ( $50 \leq Re \leq Re^*$ ) 1

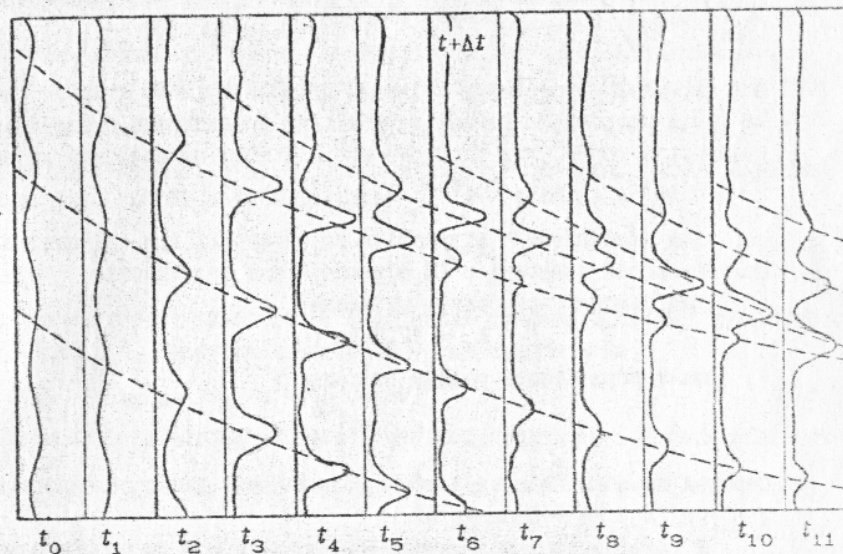


Рис.1. Еволюція за часом волнової поверхні плівки рідини ( $\Delta t = 0,05c$ ). Довжина хвилі початкового збурення  $\lambda = 25mm$ ; довжина листа  $H = 0,1m$ ;  $Re = 530$ .

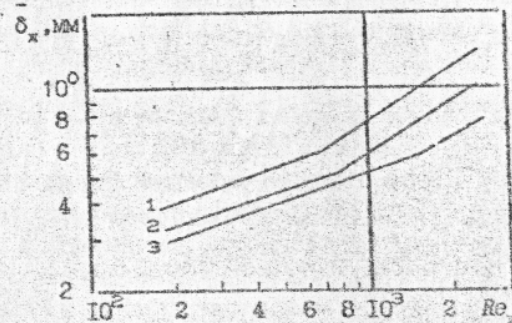


Рис.2. Середня товщина плівки на листах РШ: 1) з шорсткістю типу "періодичний виступ"; 2) з шорсткістю синусоїдального профілю; 3) гладкому.

$$\delta_{\max} = 178 \sqrt{\frac{3\nu_x^2}{4g}} Re_x^{0,698} k^{-0,327} \exp(0,33 \cdot 10^{-2} k) \left( \frac{P}{2E} \right)^{0,602} \quad (9)$$

для турбулентного режиму стікання плівки ( $Re^* < Re \leq 550$ ). Величина критичного числа Рейнольдса  $Re^*$ , як встановлено експериментально, близька до  $Re^*$  для плоского листа і може визначатися за виразом

$$Re_x^* = -3,36 \cdot 10^2 \cdot k^{0,661} \cdot \exp(-0,039k) + 1650. \quad (10)$$

Для коефіцієнтів гідравлічного опору  $\lambda_x$  при стіканні плівки по гофрованій поверхні з РШ отримані такі залежності:

для ламінарного режиму стікання

$$\lambda_x = 12,3/Re; \quad (11)$$

для турбулентного режиму стікання

$$\lambda_x = 0,012 \cdot \left[ \frac{e}{d_s} + \frac{68}{Re} \right]^{-0,25} \quad (12)$$

Середня похибка виведення експериментальних даних залежностями (8)-(12) не перевищує 5%.

У третій главі розглянена математична модель процесів тепло-масообміну при випарному охолодженні рідин в апаратах з регулярною насадкою. Для розрахунку процесів переносу тепла і маси числово вирішувались рівняння енергії та дифузії вологи

$$v_x \frac{\partial t}{\partial z} + v_z \frac{\partial t}{\partial x} = a_x \cdot \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right]; \quad (13)$$

$$w_x \frac{\partial \theta}{\partial z} + w_z \frac{\partial \theta}{\partial x} = a_\theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ a_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right]; \quad (14)$$

$$w_x \frac{\partial p}{\partial z} + w_z \frac{\partial p}{\partial x} = D_\theta \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_\theta \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (15)$$

в наближенні приграничного шару методом прогонки. Задача (13)-(15) замикається завданням крайових умов на границях спряжених областей

$$\begin{aligned} t &= t_0 & \text{при } z &= 0, \\ \theta &= \theta_n, \quad p = p_n & \text{при } z &= H, \end{aligned} \quad (16)$$

умов спряження при  $x = 0$

$$\theta = t, \quad p = p^*(t), \quad \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda_{r\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \Gamma_D \frac{D_\theta}{R_{r\theta} T} \frac{p_B - p^*}{p_B - p^*} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (17)$$

та умов симетрії на інших границях

$$\begin{aligned} \partial t / \partial x &= 0 & \text{при } x &= 0, \\ \partial \theta / \partial x &= 0, \quad \partial p / \partial x &= 0 & \text{при } x &= r. \end{aligned} \quad (18)$$

Профіль швидкостей рідини у плівці описувався співвідношенням

$$v_z = ax^2 + bx, \quad (19)$$

$$\text{де } a = -g/2\nu, \quad b = g\delta/\nu_x - \tau_r/\mu_x.$$

Профіль швидкості газу описувався співвідношенням, запропонованим Бай-Ши-І

$$w = w_{\max} \left[ 1 - 0,5 \cdot \left( \frac{r-x}{r-\delta} \right)^2 - 0,5 \cdot \left( \frac{r-x}{r-\delta} \right)^{2+\alpha} \right], \quad (20)$$

Де  $\alpha = (12\phi - 3)/(3 - 1,5\phi)$  і коефіцієнт повноти профілю швидкостей  $\phi = \bar{w}/w_{\max}$  описується емпіричним співвідношенням

$$\phi = 0,406 \cdot Re_r^{0,095}. \quad (21)$$

Запропонована модель містить у собі ефективні коефіцієнти переносу

$$v_\theta = v + v_r = v \left[ 1 + c_v \frac{x-\delta}{r-\delta} \right], \quad (22)$$

$$a_\theta = a + a_r = a \left[ 1 + c_v \cdot Pr \cdot \frac{x-\delta}{r-\delta} \right], \quad (23)$$

$$D_\theta = D + D_r = D \left[ 1 + c_v \cdot Sh \cdot \frac{x-\delta}{r-\delta} \right], \quad (24)$$

які враховують крім молекулярної складової механізму переносу також і молярний перенос (турбулентними вихрами). Коефіцієнт  $c_v$ , який входить у залежності (22)-(24) представлявся у вигляді

$$c_v = a \cdot Re_x^b \cdot Re_r^c, \quad (25)$$

де величини  $a$ ,  $b$  та  $c$  підбиралися для кожного з досліджуваних листів насадки в серії попередніх експериментів та розрахунків. Отримані в результаті вирішення спряженої задачі (13)-(18) розрахункові профілі температур рідини  $t$ , газу  $\theta$  та парціальних тисків водяної пари  $p$  у верхньому, середньому та нижньому перерізах потоку зображені на рис.3.

Застосування засобів чисельного моделювання теплообміну на основі спряженої задачі дозволяє без притягнення емпіричних залежностей розрахувати не лише сумарний тепловий потік  $q_x = q_\alpha + q_\beta$ , але й виділити та проаналізувати внесок кожної із складових - потоків тепла, які передаються теплопровідністю  $q_\alpha$  та дифузійно  $q_\beta$ .

Нааявність розрахункових коефіцієнтів тепло- і масовіддачі,

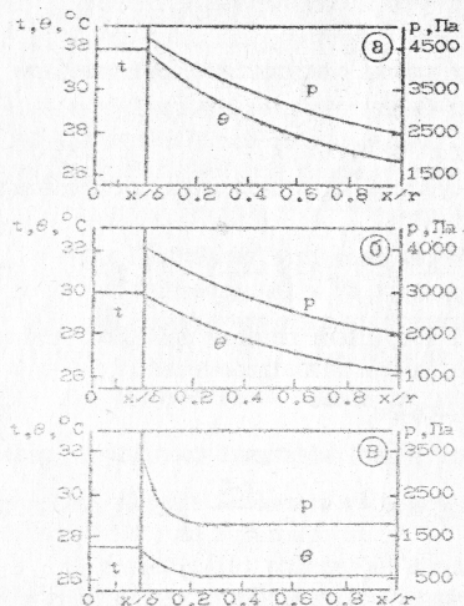


Рис.3. Розрахункові профілі температур рідини  $t$ , газу  $\theta$  та парціальних тисків водяної пари  $p$  у перерізах потоків на відстані від верхнього краю листа: а) 0,1Н; б) 0,5Н; в) 0,9Н (Н=0,35м;  $Re_r=5200$ ;  $Re_x=103$ ;  $t_0=32^\circ\text{C}$ ;  $\theta_0=26^\circ\text{C}$ ;  $p_0=1755\text{Па}$ .)

отриманих за виразами  $\alpha = q_\alpha / \Delta\theta$ ,  $\beta_p = q_p / (r_D \cdot \Delta p)$ . дозволяє провести аналіз співвідношення Льюїса  $Le$  ( $Le = \alpha / \beta_p \rho_r c_{p,r}$ ). Встановлено, що для всіх досліджених типів насадки величина співвідношення Льюїса перебуває в діапазоні від 0,95 до 1,25, що з достатньою для інженерної практики точністю свідчить про дотримання аналогії процесів переносу тепла і маси, яка використовується в інженерних розрахунках тепломасообмінної апаратури. Отримані дані по коефіцієнтах тепло- і масовіддачі представлені у вигляді залежностей

$$Nu = Nu_0 (c + b\alpha^\beta), \quad (26)$$

$$Sh = Sh_0 (c + b\alpha^\beta), \quad (27)$$

де  $c$ ,  $b$ ,  $\beta$  - коефіцієнти, які враховують тип та геометрію насадки,  $\alpha$  - амплітуда хвиль на поверхні плівки рідини, яка задовольняє співвідношенню

$$\alpha = 0,505 + 6,9 \cdot 10^{-4} Re \quad (Re > 33). \quad (28)$$

Базові співвідношення, які характеризують інтенсивність теплома-сообміну на безхвильовій поверхні плівки, мають вигляд

$$Nu_0 = 0,021 \cdot Re_{r,от}^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (29)$$

$$Sh_0 = 0,019 \cdot Re_{r,от}^{0,8} Sc^{0,43}, \quad (30)$$

де  $Re_{r,от} = d_0(w + v)/\nu_r$ .

У четвертій главі описано комплексну методику розрахунку проти- і поперечнотечійних градирень, яка вирішує пряму і зворотню задачі, що виникають, як правило, при створенні апарату. При вирішенні прямої задачі розробки апарату здійснюється взаємозв'язаний вибір вентилятора і розрахунок всіх основних вузлів апарату, який забезпечує задану холодопродуктивність або ступінь охолодження рідини. При цьому оптимізація основних вузлів апарату (вузол водорозподілу, сепарації вологи, насадковий вузол) виробляється на основі теоретичного аналізу процесів, які в них відбуваються, і виконується взаємозв'язано для апарату в цілому. При вирішенні оберненої задачі визначається ступінь охолодження рідини ( $\Delta t_x$ ) або холодопродуктивність спроектованого апарату (з відомою геометрією) при змінах температури охолоджуваної рідини ( $t_{x1}$ ), або її витрати ( $G_x$ ), або кліматичних умов роботи ( $t_{r1}$ ,  $t_{m1}$ ).

Результати досліджень були використані при проектуванні і розробці типорозмірних рядів проти- і поперечнотечійних вентиляторних градирень та випарного ступеня повітряного конденсатора. Наведені таблиці технічних характеристик розроблених типорядів вентиляторних плівкових градирень - протитечієвих продуктивністю по охолоджуваній воді від 10 до 200 м<sup>3</sup>/год та поперечнотечійних продуктивністю 10 - 100 м<sup>3</sup>/год. Апарати пройшли дослідно-промислово апробацію.

#### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що внаслідок дифракції солітонів на виступах регулярної шорсткості формується режим стікання плівки, при якому на поверхні плівки мають місце стоячі хвилі з амплітудою, сумірною з висотою виступів шорсткості. Ці стоячі великоамплітудні хвилеутворення є джерелом виносу крапельної вологи, як результат нестійкості Кельвіна-Гельмгольца. Дана нестійкість розвивається униз по потоку рідини по мірі формування амплітуди хвилі і профілю швидкостей газу. При проектуванні ТМА з плоскими насадковими елементами, які мають ПН, рекомендується для відносної висоти насадки значення  $H/d \leq 30 - 40$ .

2. Отримані значення середньої товщини плівки та коефіцієнтів гідравлічного опору рідини, при двофазному плівковому стіканні по поверхнях різної конфігурації (плоска та гофрована глад-

ка і з РН) дозволяють знаходити середні значення швидкості стікання плівки, необхідні для розрахунку процесів ТМО в плівкових апаратах.

3. Для забезпечення максимальної інтенсивності процесів переносу в газовій фазі при мінімальному виносі крапельної вологи необхідно як елементи регулярної насадки використовувати листи РН з параметрами  $e = 0,5 - 1\text{мм}$ ,  $k = 8 - 12\text{мм}$  при  $d_s = 10 - 18\text{мм}$ .

4. Розроблений ітераційний метод розрахунку турбулентних коефіцієнтів переносу (в'язкості, теплопровідності і дифузії) в газовій фазі двофазних систем дозволяє обчислити параметри теплоносіїв (середні значення температур рідини і газу а також парціальний тиск) на виході з плівкового ТМА без притягнення даних по коефіцієнтах тепло- і масовіддачі.

5. Розроблена методика інженерного розрахунку плівкових вентиляторних градирень з РН може бути покладена в основу оптимального проектування плівкових водоохолоджувачів з різними схемами контактування потоків.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ВИКЛАДЕНІ У ПРАЦЯХ:

1. Компактные охладители косвенно-испарительного типа /А.В. Дорошенко, К.И. Ржевский, Т.В. Титаренко, О.П. Литвинов.-Вопросы судостроения.-1981.-Вып.8.-С.14-17.

2. Липа А.И., Титаренко Т.В., Сикорская Е.М. Исследование гидродинамики и тепломассопереноса при испарительном охлаждении воды в поперечноточных насадочных аппаратах.-М.,1981.-15с.-Деп. в ВНИИТИ 06.10.82, №5246 -82 Деп.

3. Исследование высокоэффективных насадочных структур тепло-массообменных аппаратов / А.В. Дорошенко, В.И. Логачевский, В.Б. Вистяк, Т.В. Титаренко // Тез. докл. Всесоюз. науч.-практ. конф. "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса" (Т.Кашинев).-М.,1987.-С.101-105.

4. Экспериментальное изучение течения пленки жидкости по поверхности с регулярной шероховатостью / А.В. Дорошенко, Т.В. Титаренко, В.Г. Гайдай,В.И. Логачевский // Холодильн. техн. и технол. Респ. межвед. науч.-техн. сб.-1983.-Вып.46.-С.58-62.

5. Кириллов В.Х., Логачевский В.М., Титаренко Т.В. Расчет гидродинамики тепломассообменных аппаратов систем непрямого испарительного охлаждения радиоэлектронной аппаратуры//Холодильн. техн. и технол. Респ. межвед. науч.-техн. сб.-1989.-Вып.48.-С.19-24.

6. Численное моделирование течения пленки жидкости / Т.В.Ти-

таренко,И.Я. Яцкарь, В.Х. Кириллов, А.В. Дорошенко // Тез. докл. III Всесоюз.науч.-техн. конф. "Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон.-М.,1989.-с.20.

7. Численное моделирование течения пленки жидкости на паса-дочных элементах ТМА / Т.В. Титаренко,И.Я. Яцкарь, В.Х. Кириллов, // Тез. докл. Всесоюз.конф. "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода"- Одесса,1989.-С.73.

8. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Дорошенко А.В. Особенности проявления регулярной шероховатости в пленочных противоточных тепломассообменных аппаратах//Холодильн.техн. и технол. Респ. межвед. науч.-техн. сб.-1990.-Вып.50.-С.49-52.

9. Ахизезер В.К., Титаренко Т.В. Инженерный метод расчета градирен с регулярной насадкой для систем обратного водоснабже-ния // Масная и холодильная промышленность. - М.,1990. - Вып.10.- С.10-18.

10. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Яцкарь И.Я. Моделирование пленочного течения по гладким и шероховатым поверхностям // Холо-дильн. техн. и технол. Респ. межвед. науч.-техн. сб.-1989.-Вып.48.- С.19-24.

11. Титаренко Т.В. Численный расчет сопряженной задачи ТМО пленки жидкости с потоком газа // Тез. докл. VIII Всесоюз. конф. "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах".-Ленин-град,1990.-Т.1.-С.399-401.

12. Расчет и оптимизация пленочных вентиляторных градирен /В.Г. Гайдай, А.В. Дорошенко, Т.В. Титаренко, И.Я. Яцкарь // Тез. докл. VIII Всесоюз. конф. "Двухфазный поток в энергетических ма-шинах и аппаратах".-Ленинград,1990.-Т.111.-С.122-124.

#### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$\alpha$  - коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $D$  - коефіцієнт мо-лекулярної дифузії сумішу водяна пара-повітря,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d$  - діаметр, м;  $e$  - висота регулярної шерсткості, м;  $H$  - висота гофра насад-кового елементу, м;  $f(z)$ ,  $h(z,t)$  - рівняння профілю поверхні лис-та насадки, вільної поверхні плівки;  $H$  - висота насадки, м;  $Nu = \alpha d_s / \lambda_r$  - число Нуссельта;  $P, p$  - період гофрування, період РН, м; тиск,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $P_{cm}$  - змочений периметр, м;  $P_c$  - периметр стру-меня рідини, м;  $q$  - масова густина зрошення,  $\text{кг}(\text{м}\cdot\text{с})$ ; густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $r$  - половина товщини шару газу між лис-тами насадки, м;  $r_D$  - теплота пароутворення,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $Re_x = q/v$  -

число Рейнольдса для рідини;  $Re_r = \bar{a}_0 w / \nu_r$  - число Рейнольдса для газу;  $R_n$  - газова постійна водиної пари, Дж/(кг·град);  $Sc = \nu/D$  - число Шмідта;  $Sh = \beta \bar{a}_0 / D$  - число Шервуда;  $t$  - температура рідини, °С; час, с;  $v, w$  - швидкість стікання рідини, газу, м/с;  $We = \rho v^2 \delta^2 / \sigma$  - число Вебера;  $x$  - горизонтальна вісь координат, м;  $z$  - вертикальна вісь координат, м;  $\beta, \beta_p$  - коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрацій, м/с; парціальних тисків, с/м;  $\delta$  - товщина плівки рідини, м;  $\delta_N = [3\alpha v_x / (\rho_x g)]^{1/3}$  - товщина плівки за Нуссельтом, м;  $\theta$  - температура повітря, °С;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·град); коефіцієнт гідравлічного опору;  $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м;  $\tau$  - дотичне напруження, Н/м<sup>2</sup>.

Індекси

г - газ; ж - рідина; з - еквівалентний; т - турбулентний; x - проєкція на вісь x; z - проєкція на вісь z; 0 - при z = 0, H - при z = H; Pш - регулярна шорсткість.



Підписано до друку 16.03.1994 р. Обсяг I друк. арк. Формат 60x84  
Зам. 46. Тираж 100.

Друкарня УДАЗ Ім. О.С.Попова, Одеса, Старопортофранківська, 61.