

На правах рукопису

**АХІСЗЕР ВОЛОДИМИР КОСТЯНТИНОВИЧ**

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛІВКОВИХ ПРОТИ- ТА ПОПЕРЕЧНОТОКОВИХ  
ТЕПЛОМАСООБМІННИХ АПАРАТІВ**

Спеціальність 05.04.03. - Холодильна та криогенна техніка,  
системи кондиціювання.

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

021.5

43 36 647

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Робота виконана науково-виробничій фірмі України.



00360467 (Q)

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор  
О.В. Дорошенко

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
В.В. Притула  
- кандидат технічних наук, доцент  
С.С. Титарь

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

Захист відбудеться "13" 7 1996р. о 11 годині на  
засіданні спеціалізованої Ради Д 05.20.01 при Одеській  
державній академії холоду за адресою: 270026, м.Одеса,  
вул. Дворянська, 1/3.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотечі ОДАХ.  
Автореферат розісланий 7 грудня 1996р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради В.О.Календер'ян  
д.т.н., професор

Вих. №

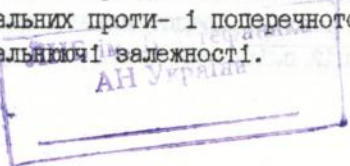
### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми:** Різке загострення взаємозв'язаних екологічних і енергетичних проблем характерно для даного етапу розвитку людства і має крайній вираз для ситуації в Україні. В зв'язку з цим особливий інтерес викликають можливості методів випарного охолодження газів і рідин, що ґрунтуються на природнім і відновлюванім потенціалі і забезпечують в практичних застосуваннях зниження енергомосткості обладнання і екологічну чистоту рішень. Плівкові проти- та поперечнотоккові ТМА з багатоканальною насадковою структурою широко використовуються в світовій практиці для реалізації процесів у вентиляторних градирнях, зрошувальних теплообмінниках (випаркувальних конденсаторах, непрямих випаркувальних повітроохолодниках) і т.ін. і область їх використання неухильно розширюється. Подальше вдосконалення таких ТМА зв'язане з необхідністю поглибленого теоретичного та експериментального вивчення особливостей плівкових течій по складнофрованим поверхням, що знайшли в таких ТМА широке застосування. Особливо це стосується поперечнотоквих плівкових ТМА, що мають значні переваги, але характеризуються порівняно малою вивченістю робочих процесів. Відсутність надійних інженерних методик розрахунку і проектування таких ТМА стримує їх широке практичне застосування.

**Мета роботи:** Теоретичне і експериментальне вивчення особливостей течії тонких шарів в'язкої рідини по складнофрованим вертикальним поверхням з регулярною шорсткістю (РШ) поверхні, визначення оптимальних параметрів РШ і умов її проявлення; експериментальне вивчення робочих процесів у багатоканальних проти- і поперечнотоккових насадкових структурах для отримання розрахункових залежностей і рекомендацій до конструювання; розробка методів проектування ТМА.

**Наукову новизну роботи складають:**

- теоретичні і експериментальні результати вивчення особливостей течії тонких шарів рідини по складнофрованим поверхням з РШ і узагальнюючі залежності;
- експериментальні результати дослідження робочих процесів у багатоканальних проти- і поперечнотоккових насадкових структурах і узагальнюючі залежності.



### Наукові положення, що захищаються в роботі:

1. Плівкова течія рідини по вертикальній вздовж гофрованої поверхні з регулярною шорсткістю характеризується, при  $K_{opt} = 8 + 14$ , наявністю регулярнохвильового режиму течії з перевагою стоячих хвиль, мінімальним бризкоутворенням при обтіканні ребер ПШ, високою інтенсивністю спільного тепломасопереносу і сталістю течії.

2. ПШ поверхні дозволяє знизити термічний опір обох фаз для проти- і поперечнотокових ТМА, а нахил ребер ПШ до набігаючого потоку забезпечує підвищення рівномірності розподілу рідини в об'ємі насадки для поперечного току.

Практична цінність роботи: Одержаний широкий теоретичний і експериментальний матеріал, узагальнений в розрахункових залежностях і рекомендаціях до конструювання, що дозволило розробити типорозмірні ряди проти- (ГРН) та поперечнотокових (ГРН/П) плівкових вентиляторних градирень, забезпечити їх промислове виготовлення (здійснюється с 1988-1990рр. СМНУ "Хладмонтажавтоматика", м.Одеса, та Симферопольським механічним заводом).

Апробація роботи: Основні результати роботи доповідались на : Всесоюзній науково - технічній конференції: "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса" (Москва, 1987р); науково-технічних конференціях всесоюзного тресту "Союзмясомонтаж" (Москва 1988 -1990рр.); науково-технічних радах Держхарчопрому України (Київ, 1993-1996рр.); 60<sup>а</sup> унверситетської науково-методичній і науково-технічній конференції професорсько - викладацького складу, наукових співробітників і студентів ОДАХ (Одеса, 1996р.); II<sup>а</sup> щорічній конференції "Энеркон-96", "Энергосбережение и сохранение окружающей среды Украины" (Київ, 1996р.); 5<sup>а</sup> науково-технічній конференції "Людина і навколишнє середовище" (Одесса, 1996р.).

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаних літературних джерел. Робота містить 149 сторінок тексту, 14 таблиць, 39 рисунків, бібліографія - 116 найменувань.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі представлені: аналіз існуючих і розроблених конструкцій плівкових проти- і поперечнотокових

ТМА; аналіз експериментальних і теоретичних досліджень процесів спільного тепломасообміну в плівкових ТМА, питання плівкових течій, стійкості, обґрунтування основних принципів конструювання плівкових ТМА з багатоканальною насадкою і вибору методу інтенсифікації процесів тепломасообміну.

Висновки, зроблені за матеріалами першого розділу, дозволили сформулювати основні задачі дослідження:

1. Провести теоретичне та експериментальне (на одноканальних моделях) вивчення особливостей хвильових течій тонких шарів в'язкої рідини по вертикальним вздовж гофрованим поверхням з регулярною шорсткістю.

2. Виявити оптимальні параметри регулярної шорсткості поверхні, що забезпечують інтенсифікацію процесів і мінімізацію втрат краплинної вологи і визначити режимні параметри, що сприяють оптимальному проявленню РШ.

3. Розглянути стійкість роздільних двофазних течій в плоских каналах і визначити умови збереження стаціонарного режиму роботи ТМА.

4. Провести експериментальне дослідження процесів у багатоканальній ТМА з вздовж гофрованими листами насадки при проти- і поперечнотоковій схемах контактування газу і рідини та виявити оптимальну геометрію оформлення таких РН для кожної із схем.

5. Отримати розрахункові залежності і розробити інженерні методи розрахунку плівкових ТМА.

6. Розробити і освоїти промисловий випуск проти- і поперечнотокових вентиляторних градирень у вигляді типорозмірних рядів автономних ТМА різної одиничної потужності.

Другий розділ роботи присвячений теоретичному і експериментальному вивченню особливостей хвильових течій рідинної плівки по вертикальній плоскій і вздовж гофрованої поверхні з РШ, яка є основним методом інтенсифікації процесу тепломасообміну. Шорсткість поверхні сприяє інтенсивному хвилеутворенню на вільній поверхні плівки, збільшує поверхню контакту рідини і газу. Течія в'язкої нестисливої рідини в загальному випадку описується рівняннями Нав'є-Стокса і нерозривності, що зв'язують компоненти вектора швидкості і тиску. Хвильовий режим визначається стоячими хвилями, а хвилі, що біжать, є лише незнач-

ними брижами, що поширюються по поверхні стоячих хвиль; періодичне рішення знайдено за методом Кутта-Мерсона. Знайдено розрахунковий профіль поверхні плівки, що стікає, і зафіксовано (для протитоку) відсутність впливу газового потоку на величину  $\delta_{ж}$  (в області  $w_r \leq 5 - 6$  м/с). Для умов плівкоструминної сталої течії по поверхні вздовж гофрованого листа, в припущенні, що маса врівноважується дотичними напруженнями на стінці каналу і на вільній поверхні рідини, одержані вирази для ламінарно-хвильового режиму течії:

$$\nabla^3 = 8,4719 \nu \delta^4 Q [\ln(\nabla + \sqrt{1 + \nabla^2}) + \nabla \sqrt{1 + \nabla^2}]^2 + 0,306 \lambda_r \nu \frac{\rho_r}{\rho} \left[ \frac{Q_r}{RH} \right]^2 \nabla^7 \quad (1)$$

для турбулентного -

$$\nabla^3 = 5,56 \cdot 10^{-2} \delta^{4,75} Q^2 (1,5 \delta^2 e / \nabla^3 + 17 \nu / Q)^{0,25} \cdot [\ln(\nabla + \sqrt{1 + \nabla^2}) + \nabla \sqrt{1 + \nabla^2}]^{1,25} + 0,306 \lambda_r \nu \frac{\rho_r}{\rho} \left[ \frac{Q_r}{RH} \right]^2 \nabla^7 \quad (2)$$

где:  $\nabla = 2\sqrt{\delta} \delta_{\max}$ ;  $\delta = 8E/P^2$

Рішення цих рівнянь відносно  $\nabla$  дозволяє визначити основні параметри струминно-плівкової течії, включаючи значення  $\delta_{ж}$  і  $\alpha = F_{ж} / F_T$ . Виконано математичне моделювання стійкості двофазних течій у плоскому вертикальному каналі (рідинна плівка стікає під впливом сили тяжіння по стінкам при наявності зустрічного газового потоку). Встановлені умови збереження стаціонарного режиму роботи ТМА при сильній гідродинамічній взаємодії фаз і запобіганні розвитку "захливання" у багатоканальній насадковій структурі. Для каналів з РШ поверхні, для  $w_{r,ш}^*$  (критичне значення швидкості газу, вище якого розвивається нестійкість) одержано:

$$w_{r,ш}^* = w_r^* \left[ 1 - a_2 \left( \frac{e}{p} \right)^{b_2} \right] \quad (3)$$

де  $w_r^*$  визначається співвідношенням:

$$w_r^* = \left[ \left[ \frac{\sigma \xi}{\rho_1 \delta_N} \operatorname{th} \left( \xi \frac{d - 2\delta_N}{2\delta_N} \right) \right]^{0,5} - \frac{\gamma_1 \operatorname{Re}_1}{\delta_N} \right] f(H, d) \quad (4)$$

де: величини  $\alpha_2 = 0,88$ ,  $\delta_2 = 0,572$  одержані на основі узагальнення дослідних даних,  $\delta_N$  - товщина рідинної плівки по Нуссельту. Вирази (3) - (4) справедливі для діапазонів  $0,3 < N_{PN} < 0,85$ ;  $d_0 = 16 - 24\text{мм}$ ;  $0 \leq \epsilon/p \leq 0,2$ .

Кількість експериментальних робіт, присвячених вивченню особливостей течії рідинної плівки по вертикальній плоскій поверхні з РШ незначне, а течія по вздовж гофрований (у напрямку течії рідини) поверхні з РШ практично не розглядалась. Проведена експериментальна перевірка теоретичних результатів вивчення плівкових течій для одно- і двофазної області, визначений оптимальний діапазон параметру шорсткості  $k = p/\epsilon$ , співвідношення поверхонь тепло- і масообміну. Використаний безінерційний і такий, що не вносить в потік збурень, метод електропровідності стосовно поверхонь складної конфігурації, що ґрунтується на вимірах електричного опору плівки за допомогою кількох електродів, закладених вщерт в підкладку. Дослідження виконане на вертикальних плоских і вздовж гофрованих листах, рівних і з РШ поверхні у вигляді рівномірно розташованих по поверхні листа горизонтальних виступів трапецієвидної форми з закругленими краями,  $\epsilon \approx 0,8 + 1$  мм. Величина  $k = p/\epsilon$  в дослідях змінювалась дискретно в діапазоні  $k = 2,5 + 36,5$ ; параметри основного рифлення:  $P = 10\text{мм}$ ,  $E = 3,8\text{мм}$ ; значення  $\delta_{\text{ж}}$  усереднювали по ширині каналу. Для плоского листа з РШ результати приведені на рис. 2.а. Видно, що перехід від ламінарної до турбулентної течії залежить від наявності РШ і величини  $k (Re_{\text{ж}}^*)$ , причому наявність РШ знижує  $Re_{\text{ж}}^*$  (для рівного листа  $Re_{\text{ж}}^* \approx 1600$ ). При  $k < 8$  відбувається ламінаризація течії; при  $k > 14$  порушується регулярнохвильовий режим; при  $k = 8 - 14$  настає стабільний регулярнохвильовий режим течії з перевагою стоячих хвиль, мінімальне бризкоутворення при обтіканні ребер, тобто умови проявлення РШ оптимальні. Для вздовж гофрованого листа відмічається струминноплівкова течія у впадинах гофрів - рис.1. Значення  $\delta_{\text{ж}}$  тут виражає максимальну товщину плівки у впадинах каналів. Гофрування поверхні спричиняє зріст  $\delta_{\text{ж}}$ ; зберігається оптимальний діапазон  $k = 8 - 14$  та регулярнохвильовий режим течії (рис. 2.б). Отримані залежності:

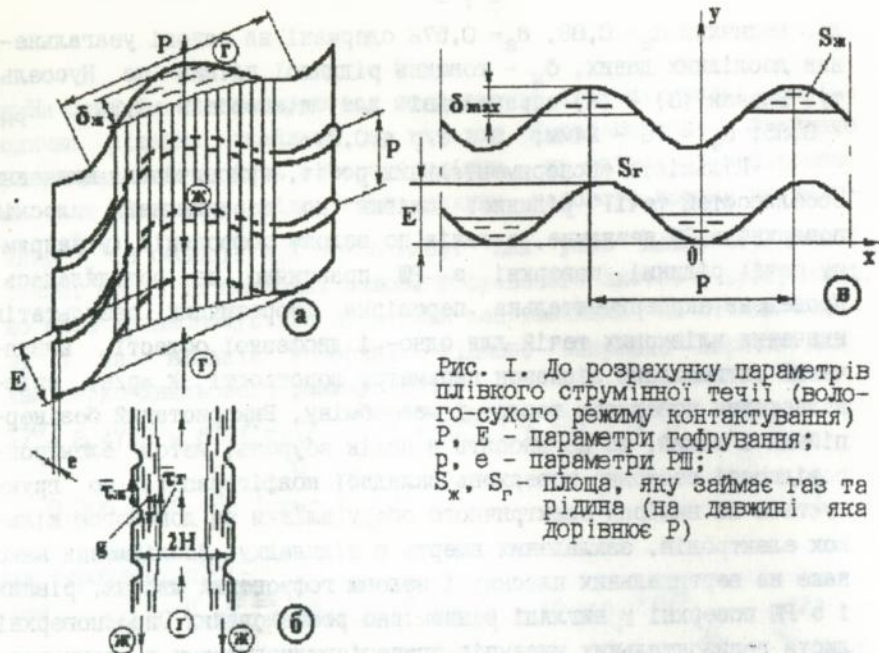


Рис. 1. До розрахунку параметрів плівкової струмінної течії (волого-сухого режиму контактування)  $P$ ,  $E$  - параметри гофрування;  $r$ ,  $e$  - параметри РШ;  $S_x$ ,  $S_r$  - площа, яку займає газ та рідина (на давжині яка дорівнює  $P$ )

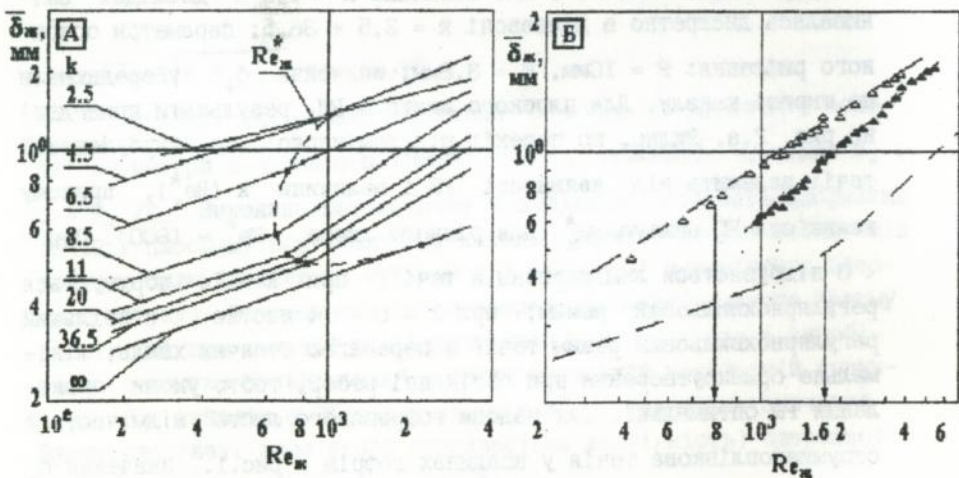


Рис. 2.А. Залежність  $\delta_x = f(Re_x, k)$  для плоского листа РШ поверхні ( $\infty$  - "гладкий" плоский лист).

Рис. 2.Б. Вплив подовжнього гофрування листа:  $\blacktriangle$  - плоский лист з РШ;  $\triangle$  - вздовж гофрований лист з РШ; (- - -) - гладкий плоский лист;  $k \approx 8,5$ .

$$\bar{\delta}_n = 0,198 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{3 v^2}{4 E}} \cdot Re^{0,404} \cdot k^{-0,591} \cdot \exp(1,44 \cdot 10^{-2} k) \times \left(\frac{P}{2E}\right)^{0,649} ; \quad Re_n = 230 - 500 \quad (5)$$

- для турбулентної області:

$$\bar{\delta}_T = 0,178 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{3 v^2}{4 E}} \cdot Re^{0,698} \cdot k^{-0,327} \cdot \exp(0,33 \cdot 10^{-2} k) \times \left(\frac{P}{2E}\right)^{0,602} ; \quad Re_T = 620 - 2600. \quad (6)$$

Розрахункові та експериментальні значення  $\bar{\delta}_x$  знаходяться в добрій відповідності. Струмлинноплівкова течія характеризується чергуванням сухих і змочених ділянок поверхні листа, при цьому в умовах тепломасообміну сухі ділянки є своєрідним оребренням змоченим, в відомій мірі компенсуючи втрату в системі тепла, що сумарно переноситься. Експериментально знайдено співвідношення поверхонь тепло- і масообміну  $\alpha = F_n/F_T$  ( $F_n$  - вільна поверхня рідинної плівки), що складає 0,3 - 0,5 і знаходиться в добрій відповідності з розрахунковими значеннями. Вплив газового потоку не проявляється до значень  $w_r \approx 6,5$  м/с (протитік), а для поперечнотокової схеми у випадку  $E \geq 3$  мм картина в цілому відповідає однофазній течії. Результати досліджень дозволили конкретизувати оптимальну геометрію вздовж гофрованого листа с ПШ поверхні як базового елемента насадки для конструювання плівкових ТМА та оптимальні режимні параметри.

**Третій розділ** присвячений експериментальному вивченню робочих характеристик проти- і поперечнотокових плівкових ТМА з багатоканальною насадкою в режимі випарного охолодження води (вентиляторні градирні). Дослідження виконане на стендах ОДАХ, причому в стенд для поперечнотокових ТМА входив багатосекційний збірник для вивчення поздовжнього зносу рідини. Розмір робочих камер для протитоку: 188 × 188 мм при висоті зони 1000мм; для поперечного току 460 × 400 × 180мм (ширина). Всього досліджено 12 протитокових і 17 поперечнотокових модулів, що відрізняються компановкою, значеннями параметрів основного гофрування ( $E = 2 - 5,3$  мм;  $P = 10 - 14$  мм), величиною еквівалентного діаметру каналів  $d_0 = 3 + 30$ ; параметрів ПШ ( $k = r/e = 8,3 - 50$ ). При

обробці дослідних даних використаний метод ентальпійного потенціалу Меркеля, раніше розвинутий стосовно поперечнотокової схеми контактування. Для багатоканальної протитоквої РН знайдено значення  $w_r^*$ , що добре корелюється з розрахунковими результатами. Аналіз фазових термічних опорів показав, що РШ поверхні інтенсифікує процес в обох фазах, що спричиняє зниження  $R_z$  у всьому дослідженому діапазоні навантажень. Величина відносного ефекту інтенсифікації  $A = (\overline{Sh}/\overline{Sh}) / (\xi/\xi)$ , де знак - означає наявність РШ (рис.3.6), має максимум в діапазоні  $k = 8 - 14$ , що відповідає раніше зробленому висновку. В діапазоні значень  $d_s = 10 - 22$  мм зафіксовано незалежність інтенсивності процесу від розміру каналів; це значення  $d_s$  оптимальне для протитоку. Небезпечність повного насичення повітря в межах робочої зони, що знижує ефективність процесу і сприяє туманоутворенню і підвищеному виносу із ТМА краплинної вологи, ілюструється рис. 3.а для різних значень  $i = G_r/G_x$  за двома серіями експерименту. Це дозволило конкретизувати оптимальні робочі навантаження для різних початкових температурних умов. Для поперечного току змінювали  $d_s = 12 - 29,9$  мм, при  $k = 12,5$ . Перехід до цієї схеми дозволяє знизити рівень енерговитрат порівняно з протитоком. Тут доцільний нахил ребер РШ до набігаючого повітряного потоку. Оптимальний кут нахилу  $\alpha = 15^\circ$  (рис. 3.в) забезпечує рівномірність розподілу рідини по всій поверхні насадки ТМА, в тому числі і для нижньої частини вхідної ділянки, і зниження матеріалоемкості насадки на 15 - 20%. РШ поверхні дозволяє зменшити  $R_z$ , рівномірно зменшуючи термічний опір обох фаз. Для поперечного току  $d_{s,opt} = 20 - 25$  мм, а оптимальна формула співвідношення габаритів насадки  $H_{РН} = L_{РН}$ , при  $V_{РН} = 1/2 \cdot L_{РН}$ . Отримані розрахункові залежності для протитоку:

$$Sh = 0,502 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,55} \cdot Re^{0,36} \quad (7)$$

для поперечного току:

$$Sh = 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot Re_r^{0,71} \cdot Re_x^{0,78} \quad (8)$$

В області значень  $E_{ж} = (t_{ж}^1 - t_{ж}^2) / (t_{ж}^1 - t_{н}^1) \leq 0,5$  очевидні переваги поперечнотокової схеми: при великих  $E_{ж}$  схеми виявляються рівноцінними ( $E_{ж,нах} \approx 0,7 - 0,8$ ), причому поперечнотокова схема менш енергомстка і, завдяки меншій  $H_{РН}$  і

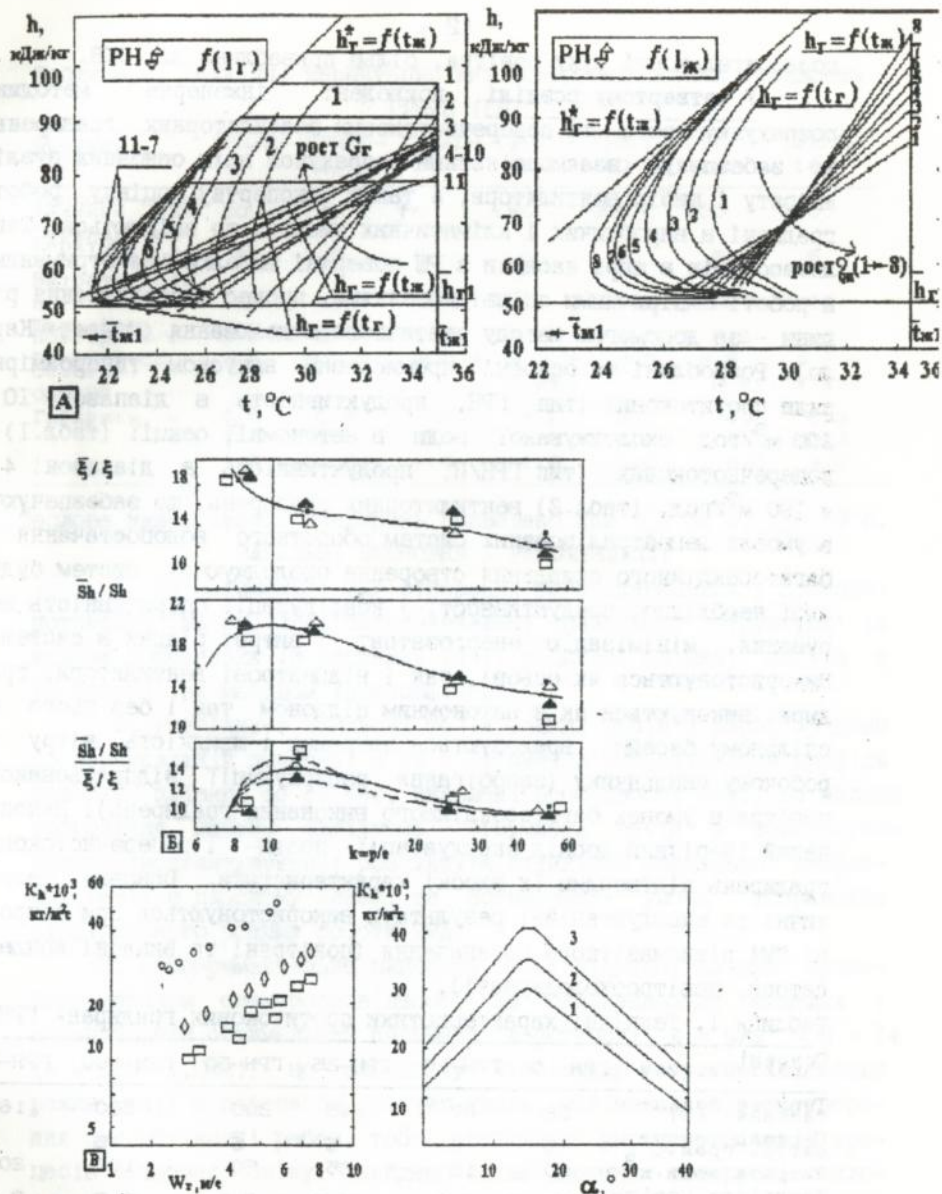


Рис. 3. Течіння залежності  $h_r = f(t_r)$  по серіям дослідів з змінним співвідношенням витрат  $L = G_w/G_r$  (А). Вплив параметра шорсткості  $k$  для протіку (Б). Вплив наявності ПШ поверхні і кута нахилу ПШ до набігаючого повітряного потоку для поперечного тока (В).

горизонтальності руху повітря, більш приваблива для СКВ.

У четвертому розділі приведені інженерна методика розрахунку проти- та поперечнотокових вентиляторних градирень, що забезпечує взаємозв'язаний розрахунок всіх основних вузлів апарату і вибір вентилятора, а також експертну оцінку роботи градирні в виробничих і кліматичних умовах, що змінюються. Тепломасообмін в шарі насадки з РШ поверхні моделюється отриманими в роботі емпіричними співвідношеннями, процес диспергування рідини - за допомогою методу статичного моделювання (Монте - Карло). Розроблені та освоєні промисловим випуском типорозмірні ряди протитокових (тип ГРН, продуктивність в діапазоні  $10 + 200 \text{ м}^3/\text{год}$  охолоджуваної води в автономії секції (табл.1) і поперечнотокових (тип ГРН/П, продуктивність в діапазоні  $4 + + 180 \text{ м}^3/\text{год}$ , (табл.2) вентиляторних градирень, що забезпечують в умовах децентралізованих систем оборотного водопостачання і багатосекційного складання створення охолоджуючих систем будь-якої необхідної продуктивності і конфігурації оперативність керування, мінімізацію енергозатрат і витрат рідини в системі. Використовуються як осьові, так і відцентрові вентилятори, градирні виконуються як з автономним піддоном так і без нього на спільному басейні, враховуються напрямок і швидкість вітру на робочому майданчику (запобігання рециркуляції відпрацьованого повітря в умовах багатосекційного виконання градирень). Накопичений 15-річний досвід експлуатації проти- і поперечнотокових градирень підтвердив їх високі характеристики. Основні теоретичні та експлуатаційні результати використовуються при розробці ТМА різноманітного призначення (повітряні та випарні конденсатори, повітроохолоджувачі).

Таблиця I. Технічні характеристики протитокових градирень ГРН

Основні характеристики	ГРН-10	ГРН-15	ГРН-25	ГРН-50	ГРН-100	ГРН-200
Теплова навантаження, кВт	58	87	145	290	580	1160
Перепад температур, град.С	5	5	5	5	5	5
Витрата води, м <sup>3</sup> /г	10	15	25	50	100	200
Швидкість повітря, м/с	3,5	3,8	3,8	3,8	3,8	3,4
Вентилятор, Об-300	№ 6,3	№ 6,3	№ 10	№ 12,5	№ 12,5	3 ВГ 25
Габарити, м	0,8	1,15	1,3	1,6	3,4	3,4
	0,8	1,15	1,3	1,6	3,4	6,8
	1,7	2,1	2,2	2,6	3,0	3,0

Таблиця 2. Технічні характеристики поперечнотокових градирень ГРН/П (ГП)

Основні характеристики	ГРН/П-4	ГРН/П-8	ГРН/П-16	ГРН/П-32	ГРН/П-60	ГРН/П-120	ГРН/П-180
Теплове навантаження, кВт	20	40	80	160	300	600	900
Перепад температур, град.С	5	5	5	5	5	5	5
Витрата води, м <sup>3</sup> /г	4	8	16	32	60	120	180
Швидкість повітря, м/с	3,6	5,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Вентилятор осьовий, ОБ-300	№ 4	№ 6,3	№ 6,3	№ 6,3-2 шт.	№ 8	№ 8 - 2 шт.	№ 8 - 3 шт.
Габарити, м	0,6	0,9	1,2	2,1	2,1	4,2	6,3
	1,9	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2	2,2
	1,9	1,9	1,9	1,9	3,0	3,0	3,0

Теплове навантаження градирень приведено при  $t_{ж1} = 32^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{м1} = 19^{\circ}\text{C}$ .

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Як оптимальні для створення багатоканальних і поперечнотокових ТМА виділені багатоканальні насадкові структури із вздовж гофрованих (в напрямку течії рідинної плівки) листів з РШ поверні як методом інтенсифікації.

2. Розглянута хвильова течія тонких шарів в'язкої рідини по вертикальній поверхні з РШ і отриманий розрахунковий профіль поверхні плівки, що стікає, виявлені особливості течії по вздовж гофрованим листам (плівково - струминна течія з вологосухим режимом контактування); розглянута стійкість роздільної двофазної течії в плоскому каналі та встановлені умови збереження стаціонарного режиму роботи ТМА.

3. Експериментальне вивчення течії рідинної плівки проведено методом електропровідності на одноканальних моделях і встановлений оптимальний параметр шорсткості  $k = r/e = 8 + I4$  ( $e \approx 0,8 - 1,0\text{мм}$ ), що забезпечує стабільний регулярнохвильовий режим течії з перевагою стоячих хвиль, мінімальне бризкоутворення при обтіканні ребер, тобто оптимальні умови реалізації процесів тепломасообміну. Знайдено співвідношення поверхонь теплоі масообміну при струминно-плівковій течії по поверхні вздовж гофрованих листів.

4. Для багатоканальних структур ТМА рекомендовано вертикальне розташування основного каналу, причому для протитоку як базовий елемент прийнятий "прямий подвійний риф", а для

поперечного току - "прямий скісний риф" з нахиленим в напрямку руху повітряного потоку ребром РШ ( $\alpha = 15^\circ$ ).

5. Показано, що РШ поверхні ( $k_{opt} = 8 + 14$ ) забезпечує в умовах багатоканальних структур інтенсифікацію процесів переносу та зафіксовано випереджаючий ріст інтенсивності  $A = (Sh/Sp)/(\xi/\xi) > 1,0$  для обох схем контактування.

6. Розроблена інженерна методика розрахунку плівкових вентиляторних градирень, що забезпечує взаємозв'язаний розрахунок всіх основних елементів ТМА та підбір вентилятора і насоса, а також можливість експертної оцінки роботи градирень у виробничих та кліматичних умовах, що змінюються.

7. Розроблені типорозмірні ряди протитокових (тип ГРН, продуктивністю  $10 + 200 \text{ м}^3/\text{год}$  води, що охолоджується в автономній секції) і поперечнотоккових (тип ГРН/П, продуктивністю  $4 + 180 \text{ м}^3/\text{год}$ ) вентиляторних градирень, які забезпечують в умовах децентралізованих систем оборотного водопостачання і багатосекційного складання створення охолоджуючих систем будь-якої необхідної продуктивності і конфігурації, оперативність керування, мінімізацію енерговитрат і втрат рідини в системах.

8. Освоєний промисловий випуск градирень ГРН (м.Одеса, СМНУ "Хладмонтажавтоматика") та ГРН/П (Симферопольський механічний завод) і накопичений багаторічний досвід експлуатації, що підтвердив надійність і високу якість обладнання.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБІТ ВИКЛАДЕНО В ПУБЛІКАЦІЯХ

1. Сикорская Е.М., Дорошенко А.В., Липа А.И., Ахизер В.К., Высокоэффективные насадочные аппараты для контактной обработки газов и жидкостей./ Сборник тезисов докладов Всесоюз. научн. практ. конф.: "Искусственный холод в отраслях агропромышленного комплекса": Москва, 1987, с.32.

2. Ахизер В.К., Титаренко Т.В., Инженерный метод расчета градирен с регулярной насадкой для систем оборотного водоснабжения./ Мясная и холодильная промышл., вып.10: Москва, 1990, с.9.

3. Кирилов В.Х., Логачевский В.И., Ахизер В.К., Устойчивость раздельного двухфазного течения в плоском канале./ Холодильная техника и технология: Киев "Техника", 1994, вып.56, с.88-93.

4. Овчаренко В.В., Гликсон А.Л., Ахизер В.К., Комплексная система повышения эффективности и экологичности сжигания топлива в котлах и рационального его использования./ Харцова 1 переробна промисловість, 1994, № 5, с.16-17.

5. Ахизер В.К., Дорошенко А.В., Пленочная теплообменная аппаратура для холодильной техники./ Сборник тезисов докладов 60 учебно-метод. и научно-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и студ. ОГАХ, Одесса, 1995, с.30.

6. Ахиезер В.К., Гликсон А.Л., Дорошенко А.В., Использование солнечной энергии для горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования воздуха. / Сборник тезисов докладов II ежегодной конференции "Энеркон-96", Киев, 1996, с.58.

7. Ахиезер В.К., Дорошенко А.В., Кирилов В.Х., Использование испарительного охлаждения в современных холодильных системах. / Сборник научных трудов 5<sup>й</sup> научно-технической конференции "Человек и окружающая среда", Одесса, 1996, с.52.

8. Дорошенко А.В., Кирилов В.Х., Ахиезер В.К., Поставитенко А.А., Тепломассообменная аппаратура пленочного типа для холодильной техники. / Сборник научных трудов 5<sup>й</sup> научно-методической конференции "Человек и окружающая среда". Одесса, 1996, с.62.

#### СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ТМА - тепломассообмінні апарати; РШ - регулярна шорсткість;  $k$  - відносний шаг ребер шорсткості;  $r$ ,  $e$  - шаг і висота ребер;  $P$ ,  $E$  - шаг і висота рифлення; РН - регулярна насадкa;  $\delta$  - товщина;  $w$  - швидкість;  $F$  - площа поверхні;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності;  $d_3$  - еквівалентний діаметр каналів;  $H$  - висота;  $L$  - довжина;  $B$  - ширина;  $\rho$  - густка;  $\xi$  - коефіцієнт гідравлічного опору;  $t$  - температура.

Індекси:  $г$  - газ;  $ж$  - рідина;  $м$  - мохрий;  $\Sigma$  - сумарний;

\* - критический.

#### АННОТАЦІЯ

Ахиезер В.К. Разработка и исследование пленочных противопоперечноточных тепломассообменных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.03 - холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования. Одесская государственная академия холода, Одесса 1996.

В диссертации изложены и обосновываются:

- методики теоретического и экспериментального исследования процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении воды в пленочных ТМА с многоканальной насадкой при противопоперечноточной схемах контактирования;
- результаты изучения особенностей течения тонких слоев вязкой жидкости по вертикальным плоским и продольноффрированным листам с регулярной шероховатостью поверхности;
- результаты изучения рабочих процессов в многоканальных структурах пленочных ТМА при испарительном охлаждении, включая рекомендации по конструированию таких структур и ТМА.

Защищаются научные положения, характеризующие оптимальные

286151

условия реализации рабочих проце-  
 вия проявления РШ поверхности и распределения материальных по-  
 токов в объеме насадочного слоя.

Ключевые слова: испарительное охлаждение, тепломассообмен,  
 регулярная насадка, регулярная шероховатость поверхности, вен-  
 тилиаторная градирня.

**SUMMARY**

Akhiezer V.K. Investigation of evaporative cooling processes  
 and development of film counter- and cross-flow heat-and-mass  
 transfer apparatus. The dissertation on award of a degree of  
 the candidate of technical sciences on speciality 05.04.03 -  
 Refrigerating and cryogenic engineering, systems of conditioning.  
 Odessa State Academy of Gold, Odessa 1996.

The thesis suggests and motivates:

- methods of theoretical and experimental study of joint  
 heat-and-mass transfer processes during evaporative water  
 cooling in film HMA-s with multi-channel packing bed in  
 counter-and cross-flow contacting schemes;
- results of studying the peculiarities of viscous liquid thin  
 layers flowing along vertical plane and longitudinally  
 corrugated sheets with regular roughness of the surface;
- results of studying the working processes in multi-chamel  
 structures of film HMA-s in evaporative cooling, including  
 recommendations for constructing such structures and HMA-s.

Proved are scientific statements characterizing optimal  
 conditions of the working processes implementation including  
 optimal conditions for the reveal of RR (regular roughness) of  
 the surface and the distribution of material flows in the  
 volume of the packing bed layer.

Key words: evaporative cooling, heat-and-mass transfer,  
 regular roughness of the surface, fan cooling tower.

