

Автореферат
К43

Н

ОДЕСЬКИЙ
ІНСТИТУТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

На правах рукопису

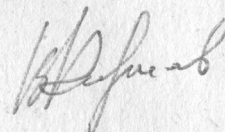
КИРИЛОВ Володимир Харитонович

ГІДРОДИНАМІКА ТА ТЕПЛОМАСООБМІН
В ДВОФАЗНИХ ПОТОКАХ
ПЛІВКОВИХ АПАРАТІВ
ДЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Спеціальність 05.04.03 — машини та апарати холодильної і криогенної техніки та систем кондиціонування.

Спеціальність 05.18.12 — процеси, машини та агрегати харчової промисловості.

АВТОРЕФЕРАТ
ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ ВЧЕНОГО СТУПЕНЯ
ДОКТОРА ТЕХНІЧНИХ НАУК



Робота виконана в Одеському інституті низькотемпературної техніки та енергетики.

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук, професор
КАНЕВЕЦЬ Г. Є.
- доктор технічних наук, професор
КАЛЕНДЕР'ЯН В. А.
- доктор технічних наук, професор
ОСТАПЧУК М. В.

Провідна організація

- науково-дослідний інститут технології
криогенного машинобудування, м. Одеса.

Захист відбудеться « 16 » — 05 — 1994 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої ради Д.068.87.01 при Одеському інституті низькотемпературної техніки та енергетики за адресою: 270100, м. Одеса, вул. Петра Великого, 1/3.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розіслано « 21 » — 03 — 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

Р. К. Нікульшин

Взам.				
Лист				
№ докум.				
Політик				

- 3 -

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Економічна політика повинна передбачати високі темпи приросту промислової продукції, переведення виробництва на інтенсивний шлях розвитку, технічне переозброєння промисловості, що можливо лише на основі покращення якісних характеристик існуючих і створюваних машин і апаратів. Найважливішою ланкою холодильної техніки, що визначає енергетичні та масогабаритні характеристики, є тепломасообмінна апаратура (ТМА).

Одним з прогресивних способів взаємодії фаз в контактних пристроях ТМА є здійснення контактування фаз при плівкових і струминних течіях. Цим пояснюється широке застосування таких видів течій в хімічній та харчовій промисловості, енергетиці та інших областях сучасної техніки для здійснення багатьох технологічних процесів зв'язаних з тепломасообміном, фазовими і хімічними перетвореннями.

Плівкові та струминні течії використовуються в високопродуктивних ТМА, що дозволяють переробляти великі потоки рідини та газів з низькими енергозатратами.

Плівкові та струминні течії займають визначне місце в теоретичній і, особливо, прикладній механіці в'язкої рідини; плівкові течії представляють також певний інтерес як зручна нелінійна модель для дослідження загальних уявлень теорії гідродинамічної стійкості.

Широкому впровадженню в промисловість ТМА з плівковою та плівково-струминною течією сприяє ретельне дослідження гідродинаміки та тепломасообміну (ТМО) у контактному пристрої таких апаратів і розробка на цій основі надійних методів їх розрахунку, що в особливій мірі необхідно на стадії проектування.

Таким чином, розробка методів розрахунку гідродинаміки та ТМО при двофазних плівкових і плівково-струминних течіях у контактному пристрої ТМА має важливе народногосподарське значення.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи була розробка методів розрахунку гідродинаміки та процесів ТМО і створення на цій основі інженерної методики проектування ефективної плівкової ТМО апаратури випаровувального охолодження рідин і газів. Ця мета досягається розв'язуванням наступних задач: в нелінійній постановці дослідити регулярний хвильовий режим вільної течії плівки рідини по вертикальній поверхні та визначити хвильові характеристики течії; провести дослідження нестійкості

xv 12 15
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

ті ламінарної течії плівки рідини в умовах контактної взаємодії з потоком газу і визначити граничну швидкість газу для протиточної схеми течій з врахуванням особливостей двофазних потоків в контактному пристрої ТМА; розробити модель гідродинамічної взаємодії фаз на хвильовій поверхні поділу та дослідити хвильові режими течії плівки рідини при контактній взаємодії з турбулентним газовим потоком; встановити основні закономірності ТМО в процесах випаровувального охолодження тонкого шару рідини, що тече по гладкій вертикальній поверхні; провести математичне моделювання гідродинамічних та ТМО процесів при плівковій і плівково-струминній течії рідини по складнопрофільованим (плоским і гофрованим з РШ) елементам насадок при різних схемах матеріальних потоків; встановити основні закономірності процесів ТМО в контактному пристрої непрямого випаровувального типу; розробити методику прямого і оберненого теплового розрахунку ТМО обладнання для вентиляторної градирні з регулярною насадкою і для непрямого випаровувального повітроохолоджувача.

Наукова новизна. Створено новий науковий напрямок в області холодильного машинобудування – розробка методів розрахунку гідродинаміки та тепломасообміну у контактному пристрої ТМА в двофазній системі рідина-газ для плівкових і плівково-струминних течій на основі сучасних досягнень механіки рідини та газу, теорії тепло- і масообміну, обчислювальної математики.

В результаті теоретичних досліджень уперше:

- методом Ляпунова теорії стійкості з врахуванням експериментальних даних інших авторів, одержано розрахункове співвідношення для граничної швидкості газу при протиточі з плівкою рідини з врахуванням двофазних течій у контактному пристрої ТМА;

- на основі запропонованої моделі контактної гідродинамічної взаємодії фаз і в результаті розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса-Рейнольдса для двофазних систем в нелінійній постановці методом Кармана-Польгаузена проведено розрахунок основних параметрів плівки рідини при її регулярно-хвильовій течії (профілю швидкості, амплітуди та довжини хвилі). Встановлено існування солітонних розв'язків;

- в результаті розв'язування рівняння Прандтля одержано профіль вільної поверхні рідини, що тече по вертикальній поверхні з великою висотою виступів регулярної шорсткості циліндричної форми;

визначена амплітуда стоячої хвилі і середня товщина плівки при взаємодії з потоком газу;

- на основі розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса в постановці Прандтля одержані значення найбільшої товщини струменя рідини, що тече у випадіні гофрованої поверхні в умовах проти- і перехресного потоку фаз;

- з допомогою розв'язування рівнянь конвективного тепломасообміну, що описують процеси випаровувального охолодження у контактному пристрої ТМА, застосовуючи співвідношення Кадера для коефіцієнтів опору і теплообміну, одержано значення основних параметрів рідини й газу на виході з апарата;

- розроблено аналітичний метод розв'язування рівнянь ТМО для плівкових і плівково-струминних течій відповідно по плоским і продовжко- гофрованим елементам насадок в умовах перехресного потоку фаз;

- запропоновано метод дослідження процесів ТМО у контактному пристрої непрямого-випаровувального типу при різних схемах руху матеріальних потоків;

- на основі розв'язування рівнянь ТМО, що описують процеси прямого і непрямого випаровувального охолодження, одержано границю охолодження середовища, відповідає адіабатичному випаровуванню рідини;

- розроблено методику прямого й оберненого теплового розрахунку контактних пристроїв прямого й непрямо-випаровувального типу при різних схемах руху потоків.

Основні наукові положення, які захищаються в роботі:

1. Основою створення методів інженерного розрахунку контактних пристроїв ТМА є математичне моделювання спільного тепломасообміну, що враховує характерні особливості двофазних потоків.

2. Хвилі збурення, які виникають на поверхні поділу, є причиною зносу капелів при двофазній плівковій течії (нестійкість Кельвіна-Гельмгольца). Визначення граничної швидкості газу доцільно робити за теорією гідродинамічної стійкості потенціальних течій.

3. Для контактних пристроїв плівкових ТМА великої пропускної спроможності коефіцієнти теплообміну і опору визначаються співвідношеннями Кадера.

4. Однозначна розв'язуваність задачі проектування насадок на основі математичного моделювання гідродинаміки та процесів випаро-

вузального охолодження забезпечується заданням :

- 1) фронтальної густини зрошення q_p і відносною витратою повітря λ - для протиточної (прямоточної) градирні;
- 2) $q_p \cdot \lambda$ і швидкості течії повітря v_o - для перехресноточної градирні;
- 3) $q_p \cdot \lambda$, швидкості основної течії v_o і допоможної течії v_b повітря - для повітроохолоджувачів непрямо-випаровувального типу.

Практична цінність роботи полягає в наступному: І. На основі розроблених методів розрахунку гідродинаміки та ТМО в двофазних системах одержано розрахункові співвідношення для гідрравлічних і теплофізичних характеристик матеріальних потоків (товщина плівки, гранична швидкість газу, еквівалентний діаметр, коефіцієнти опору, числа Рейнольдса і Нусельта, співвідношення поверхонь тепло- та масообміну, границя охолодження, температура рідини і газу на виході з апарата та ін.), які необхідні при тепловому й гідродинамічному розрахунку та проектуванні ТМА.

2. Розроблена і впроваджена в практику інженерна методика розрахунку контактних пристроїв прямого й непрямо-випаровувального типу для плівкової тепломасообмінної апаратури.

Реалізація результатів дослідження. Результати роботи використані при розробці типорозмірного ряду проти- й перехресноточних вентиляторних градирень, при створенні непрямих випаровувальних повітроохолоджувачів технологічного призначення (охолодження РЕА) й комфортного кондиціонування повітря, а також при розробці повітряно-випаровувальних конденсаторів для холодильних установок в організаціях ВО "Одесахолодмаш", Одеський механічний завод, ВО "Продмаш" (м.Одеса), дослідно-механічний завод (м.Симферополь), ВО "Екватор" (м.Миколаїв) та ін.

Апробація роботи. Основні результати дисертації були предметом доповідей і обговорень на Республіканській конференції "Обчислювальна математика в науково-технічному прогресі" (Київ, 1982); на Всесоюзній науковій конференції "Метод А.М.Янчукова в сучасній математиці" (Харків, 1986); на Всесоюзній науково-практичній конференції "Інтенсифікація виробництва та застосування штучного холоду" (Ленінград, 1986); на Всесоюзній науково-практичній конференції "Штучний холод в галузях агропромислового комплексу" (Кишинів, 1987); на Всесоюзній науковій конференції "Диференціальні та інтегральні рівняння і їх застосування" (Одеса, 1987); на Всесоюзній

науково-практичній конференції "Сучасні машини й апарати хімічних виробництв" (Чимкент, 1988); на Всесоюзній науково-технічній конференції "Створення й впровадження апаратів з активними гідродинамічними режимами для текстильної промисловості" (Москва, 1989); на Всесоюзній науково-практичній конференції "Шляхи інтенсифікації виробництва з застосуванням штучного холоду" (Одеса, 1989); на Всесоюзній науково-практичній конференції "Двофазний потік в енергетичних машинах і апаратах" (Ленінград, 1990); на Всесоюзному симпозіумі "Метод дискретних особливостей в задачах математичної фізики" (Одеса, 1991); на Республіканській науково-методичній конференції, посвяченій 200-річчю від дня народження М.І.Лобачевського (Одеса, 1992); на наукових конференціях ОТХП (Одеса, 1980-1990).

Публікація результатів дослідження. По темі дисертації опубліковано більше 40 друкованих робіт, в яких відображені основні положення і результати. Одержано одне авторське свідоцтво на винахід.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, II глав, основних висновків, списку використаної літератури (228 найменувань) і додатків. В ній міститься 281 сторінка основного тексту, 16 таблиць та 81 рисунок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність, сформульована мета дослідження, вказана наукова новизна та практична цінність роботи.

Глава I. Перспективи використання регулярних насадок для організації процесу випаровувального охолодження.

Висока інтенсивність процесів переносу при малих енергозатратах роблять плівкові ТМА перспективним типом апаратури для ХТ та КП. Ефективність таких охолоджувачів залежить від гідродинамічної обстановки у контактному пристрої. Найбільш сприятливі умови у цьому відношенні досягаються при ламінарній плівковій течії рідини та турбулентному потоці газу, причому найбільш сприятливими будуть протиточні та поперечно-протиточні схеми взаємодії матеріальних потоків. Для інтенсифікації процесів випаровувального охолодження рідини необхідно забезпечити умови по збільшенню коефіцієнтів переносу у газовій фазі. Це досягається для плоскопаралельної наса-

дочної структури за допомогою використання складнопрофільованих елементів (гофрованих, з РН та інших). В ОІНТЕ розроблені ефективні контактні пристрої, в яких застосовуються алюмінієві листи з регулярною шорсткістю. Аналіз літературних даних по вивченню гідродинаміки плівкових течій та процесів ТМО для двофазних плівкових потоків в умовах випаровувального охолодження дозволив обґрунтувати мету та задачі дослідження.

Глава II. Загальні закономірності течії плівок рідини рідини у насадочному шарі ТМА випаровувального охолодження.

Першою необхідною умовою для здійснення ефективного міжфазного ТМО у контактному пристрої є утворення стійкої плівки рідини, що забезпечується певною густиною зрощування, мінімальне значення якої визначається умовами змочування та розтікання по елементу насадки. По формулі Хоблера для плівкової течії води по обезжиреній алюмінієвій вертикальній поверхні $\Gamma_{\min} = 0.01 - 0.02 \text{ кг/(м с)}$, що відповідає числу Рейнольдса $Re_1 = \Gamma_{\min} / \mu_1 = 11 - 20$. Для сприятливої гідродинамічної обстановки у контактному пристрої плівкового ТМА область навантажень по рідині та газу повинна бути в границях $25 \leq Re_1 \leq 120$, $3 \leq v \leq v_{rp}$. Математичне описання течії тонкого шару в'язкої рідини при прямоточному контактуванні з турбулентним потоком газу у плоскопаралельній насадці зводиться до слідувочої системи рівнянь та граничних умов (у безрозмірній формі)

$$\frac{\partial u_1}{\partial \tau} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = - \frac{\partial p_1}{\partial x} + \frac{v_1 l}{u_0 r_0^2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \frac{1}{Pr} \quad (1)$$

$$\frac{u_0}{v_0} \frac{\partial u_2}{\partial \tau} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} = - \frac{\partial p_2}{\partial x} + \frac{v_2 l}{v r_0^2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(1 + \frac{v_T}{v_2} \right) \frac{\partial u_2}{\partial y} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p_2}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

$$\text{при } y = h(\tau, x) \quad v_1 = \frac{\partial h}{\partial \tau} + u_1 \frac{\partial h}{\partial x}, \quad u_2 = \frac{u_0}{v_0} u_1, \quad v_2 = \frac{u_0}{v_0} v_1.$$

$$p_1 + \frac{1}{We} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \theta_2 p_2, \quad \frac{\partial u_1}{\partial y} = \theta_1 \left(1 + \frac{v_T}{v_2} \right) \frac{\partial u_2}{\partial y}; \quad (4)$$

$$\text{при } y = 0 \quad u_1 = v_1 = 0; \quad \text{при } y = r \quad \tau_{xx} = 0,$$

де $y = h(\tau, x)$ - рівняння вільної поверхні; $\theta_1 = \frac{\mu_2 v_0}{\mu_1 u_0}$, $\theta_2 = \frac{\rho_2 v_0}{\rho_1 u_0^2}$ - параметри гідродинамічної взаємодії.

З динамічних умов (4) витікає, що при $\theta_1 < 1$, $\theta_2 < 1$ дією газового потоку можна знехтувати. Для двофазної системи вода-повітря у межах робочих режимів ТМА це має місце при $v_0 < 3.5 \text{ м/с}$. В протилежному випадку ($3.5 \leq v_0 < v_{rp}$) вплив газу істотний і цю область швидкостей будемо називати областю сильної гідродинамічної взаємодії.

Глава III. Гідродинаміка і тепломасообмін при слабкій гідродинамічній взаємодії.

Хвильова однофазна течія плівки рідини у цьому випадку описується рівнянням руху (1) та нерозривності (3) з крайовими умовами (4) при $\theta_1 = \theta_2 = 0$. При розв'язку даної задачі доводиться переборювати математичні труднощі, які обумовлені, по-перше, нелінійністю самих рівнянь, по-друге, наявністю малого параметра при старшій похідній, і, по-третє, при розв'язку системи рівнянь необхідно визначати поверхню контакту фаз.

Згідно методу Кармана-Польгаузена, припускаючи профіль швидкості u_1 параболічним, виключаючи v_1 і p_1 , а також провівши осереднення рівнянь (1), (3) по товщині шару h , вихідна задача зводиться до рівнянь (у розмірній формі)

$$h^2 \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + 2.4 h q \frac{\partial q}{\partial x} - 1.2 q^2 h_x' = \frac{\sigma}{\rho} h^3 h_{xxx}'''' + gh^3 - 3 v_1 q \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Дослідження даної системи рівнянь, в зв'язку з хвильовим характером руху рідинної плівки, проводиться в ряді фундаментальних робіт Капіли П.Л., Кутателадзе С.С. і Стирковича М.А., Накорякова В.Е. і Покусаява Б.Г., Шкадова В.Я. і Холпанова Л.П. Аналіз результатів цих робіт дозволив визначити хвильові характеристики для двофазної системи повітря-вода. В подальшому (глава 5) ці результати використовуються як початкові наближення при чисельному дослідженні хвильових режимів двофазної течії у випадку сильної гідродинамічної взаємодії фаз.

Гідродинаміці та тепломасообміну в умовах плівкової течії рідини при відсутності хвилювання присвячено цілий ряд робіт, а число робіт, в яких досліджується ТМО в умовах хвильового характеру двофазної течії, досить обмежене. Між тим розрахунок ефективності процесів випаровувального охолодження при наявності хвилювання

рення являє практичний інтерес, бо хвилі на поверхні плівки рідини значно інтенсифікують процеси ТМО. При чому ця інтенсифікація, як відомо, у великій мірі пов'язана з регулярними дрібноамплітудними хвилями, оскільки більша частина поверхні ТМО покрита дрібними хвилями і дуже мала частина зайнята крупними хвилюваннями.

Глава IV. Стійкість роздільної двофазної течії. Дослідження нестійкості Кельвіна-Гельмгольца.

При проектуванні плівкових апаратів великої пропускної спроможності необхідно з достатньою степінню точності визначати граничне навантаження газової фази, перевищення якого приводить до захливання апарата.

Наявність впливу газового потоку (при $v_0 \geq 3.5$ м/с) приводить до нового виду нестійкості поверхні рідини, який вперше був встановлений Кельвіном, а потім Гельмгольцем у зв'язку з виникненням хвиль під впливом вітру. При досить великій швидкості газу амплітуда хвиль на поверхні плівки рідини, яка тече по вертикальній поверхні, зростає з часом аж до зруйнування крупних хвиль на дрібні краплини, котрі виносяться потоком газу. Разом зі збільшенням швидкості газу у зрошувальному каналі кількість крапель зростає, разом з цим зростають також і гідравлічні втрати. Швидкість газу v_* у даних умовах при яких відбувається початок краплинності називається граничною. Як показано в роботі Х'юїтта і Холл-Тейлора на основі досліджень Мейлаа і Брук-Бенджаміна для довгих хвиль, вклад у сили, які намагаються змінити форму хвиль, флуктуючого дотичного напруження значно менше, ніж від нормального. На цій основі при дослідженні механізму нестійкості Кельвіна - Гельмгольца можна розглядати обидва середовища (рідину і газ) як ідеальні рідини і застосувати теорію потенціальних течій. Таким чином, для двофазної плівкової течії у плоскому каналі маємо рівняння Лапласа $\Delta \phi_i = 0$ ($i = 1, 2$, $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ - оператор Лапласа), (7) де ϕ_i - потенціали швидкостей, та інтеграли Коші-Лагранжа

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{1}{2} |\text{grad } \phi_1|^2 - g x + \frac{p_1}{\rho_1} = f(\tau). \quad (8)$$

Граничні умови при цьому такі:

$$\begin{aligned} \text{при } y = h(\tau, x) \quad p_1 - p_2 &= \sigma h_{xx}, \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial y} = \frac{\partial \phi_2}{\partial y} = u_{0y}, \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = \frac{\partial \phi_1}{\partial x} + v_{0x} \\ \text{при } y = 0 \quad \partial \phi_1 / \partial y &= 0, \quad \text{при } y = r \quad \partial \phi_2 / \partial y = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Застосовуючи метод Лапунова (теорії стійкості) до задачі (7)-(9), отримуємо шукане значення граничної швидкості (для протитечії фаз)

$$v_* = \left(\frac{\sigma \zeta}{\rho_2 h_0} \tanh \left(\frac{r}{h_0} - 1 \right) \right)^{1/2} - u_0. \quad (10)$$

де величина ζ має бути визначена.

Проведено порівняльний аналіз літературних теоретичних та експериментальних даних по визначенню граничної швидкості газу в умовах протиточної течії фаз. Установлено, що ці дані у визначенні граничних навантажень розходяться більш, ніж на 200%. Ці розходження пояснюються впливом довжини та діаметра каналу, а також умовами на кінцях труб. Як базові дані прийнято експериментальні результати, які одержані Олевським та співробітниками. Звідки випливає для величини

$$\zeta = \alpha We^a (\mu_2/\mu_1)^b \quad (11)$$

за методом найменших квадратів $\alpha=0.01$, $a=-0.5$, $b=-0.12$. (12)

Враховуючи також довжину каналу H , гранична швидкість газу визначається таким чином (Олевський)

$$v_{*0} = \frac{H}{d} (0.38 d - 0.015) v_* + 0.07 d^{-0.8}. \quad (13)$$

Наявність РП на робочій поверхні контактної пристрою приводить до додаткової дестабілізації двофазної течії. В цьому випадку пропонується визначити граничну швидкість за формулою:

$$v_{rp} = v_{*0} [1 - a_1 (e/p)^{b_1}]. \quad (14)$$

Обробка експериментальних даних за методом найменших квадратів дає

$$a_1 = 0.88, \quad b_1 = 0.572. \quad (15)$$

Співвідношення (11)-(15) справедливі у такому діапазоні: $20 < Re_1 < 100$, $0.3 \text{ м} < H < 0.85 \text{ м}$, $0 \leq e/p < 0.2$, $16 \text{ мм} < d < 24 \text{ мм}$.

Вираз (14) надалі (глава 10) використовується при розрахунку контактних пристроїв плівкових ТМА.

Глава V. Гідродинаміка і тепломасообмін при сильній взаємодії потоку газу та плівки рідини.

Хвильові режими течії при сильній гідродинамічній взаємодії визначається системою рівнянь (1)-(4). Розв'язок даної системи шукаємо за методом Кармана-Польгаузена, пропонуємо профілі швидкостей в такому вигляді (параболічний для рідини і степенеий для

турбулентної течії газу):

$$u_1 = 3q_1 y(1 - y/2h)/h^2 - \tau_1 y(1 - 3y/2h)/2\mu_1 \quad (16)$$

$$u_2 = u_1 + \frac{n+1}{n} \left(\frac{y-h}{r-h} \right)^{1/n}, \quad 6 < n < 7. \quad (17)$$

Підстановка (16) і (17) в (1) - (4) і усереднення рівнянь руху по ширині відповідного потоку дає

$$q'_t + (2.4q/h + \tau_1 h/2Q\mu_1)q'_x - (1.2q^2/h^2 - \tau_1 q/2Q\mu_1 - \tau_1^2 h^2/4Q\mu_1)h'_x + (qh/2Q\mu_1 + \tau_1 h^3/6Q\mu_1^2)\tau'_{1x} = -hp'_{2x}/\rho_1 + \sigma h'''_{xxx}/\rho_1 + gh + 3\tau_1/2\rho_1 - 3v_1 q/h^2 \quad (18)$$

$$q'_t - \frac{q \times}{n(n+1)} \{ (n+1)^2 \bar{u}_2^2 - u_1^2 + 3(r-h)(\bar{u}_2 - u_1)(q/h^2 - \tau_1/4\mu_1) \} h'_x - 2(n+1)^2 \bar{u}_2 - u_1 - 1.5(1-r/h)(\bar{u}_2 - u_1) \} q'_x - (h/2\mu_1)(r-h)(\bar{u}_2 - u_1)\tau'_{1x} = p'_{2x}(r-h)/\rho_2 - \tau_1/\rho_2$$

Задано дотичне напруження на поверхні поділу $y=h(x, t)$ у наступному вигляді: $\tau_1 = \frac{\xi}{g} \rho_2 (\bar{u}_2 - u_1)^2$, $\xi = 0.316/Re^{0.25}$.

Система рівнянь (26) зводиться до безрозмірної форми, а оцінка членів в кожному із рівнянь, виключаючи $\partial p_2/\partial x$, дає

$$h^2 q'_t + h q'_x (2.4q + T_1) - h'_x (1.2q^2 - qT_1 - 10T_1^2 + Sh^3 \bar{u}_2^2) = h^3 \sigma h'''_{xxx}/\rho_1 + gh^3 + 30T_1 - 3v_1 q, \quad S = (\rho_2/\mu_1 \rho_1) \cdot (n+1)^2/(n+2) \quad (19)$$

$$h'_t + q'_x = 0. \quad (20)$$

$$\text{де } T_1 = \xi \rho_2 (\bar{u}_2 - 1.5q)^2/16Q\mu_1, \quad \bar{u}_2 = v_0 \left(1 - \left(\frac{q - q_0}{v_0 r} - \frac{h - h_0}{r} \right) \right).$$

Для ламінарної безхвильової двофазної течії

$$q = q_0 (\text{const}), \quad h = h_0 (\text{const}), \quad (21)$$

тоді товщина шару h_0 , згідно (19), задовольняє рівняння

$$h_0^3 + 1.5 \tau_0 h_0^2/\rho_1 g - 3q_0 v_1/g = 0. \quad (\tau_0 = \xi \rho_2 v_0^2/g).$$

врахувавши, що $1.5\tau_0/\rho_1 g h_N < 1$, згідно методу збурення, знаходимо (для протитечії)

$$h_0 = h_N + \tau_0/2\rho_1 g, \quad \text{де } h_N = (3v_1 q_1/g)^{1/3} \quad (\text{Нусельт}). \quad (22)$$

Досліджуємо стійкість безхвильової течії (21), для чого відносно рівнянь (19), (20) застосуємо метод Ляпунова. В результаті дістанемо, що умова стійкості має вигляд

$$0 < c < 1.2 + T(1-3\beta)/40, \quad T = \tau_0 h_0^2/\mu_1 q_0 \quad (23)$$

$$c > 13 - T(1+3\beta)/2/(1 + 1.5\beta T), \quad \beta = q_0/h_0 v_0.$$

У протилежному разі має місце нестійкість хвильового режиму, при цьому амплітуда з часом необмежено зростає. Серед зростаючих хвиль виділимо хвилі, які матимуть максимальний зріст. Параметри цих хвиль для двофазної системи визначаються наступними співвідношеннями: для фазової швидкості

$$c_* = 3.9454 Re_1^{-0.17} - 3.45 \cdot 10^{-4} Re_1^{-0.17} Re_2^{0.61}; \quad (24)$$

для довжини хвилі

$$\lambda_* = 155.774 Re_1^{-0.3} - 5.47 \cdot 10^{-2} Re_1^{-0.3} Re_2^{0.74}. \quad (25)$$

Наявність зустрічного або супутного газового потоку ще більше ускладнює картину хвильових течій, але і в цьому випадку, також як і при вільному (без газу) їх русі, мають місце два типи хвиль - дрібномасштабні брижі з порівнюваною високою частотою та крупні низькочастотні хвилі. Ці два типи хвиль повинні визначатися із рівняння (19). Перший тип хвиль (регулярний хвильовий режим) має малу амплітуду і в цьому випадку розв'язок (19) одержується методом збурень. Проводиться чисельний розв'язок, при чому для фазової швидкості c і довжини хвилі λ використовуються значення, які відповідають максимально зростаючим хвилям (24), (25). Степенева апроксимація одержаного розв'язку для двофазної системи повітря-вода дає наступні вирази: для середньої товщини шару рідини

$$h_0 \cdot 10^4 = 0.688 Re_1^{0.295} + 0.137 \cdot 10^{-7} Re_2^{1.77}, \quad \text{м}; \quad (26)$$

для амплітуди хвилі

$$\alpha = 0.428 Re_1^{0.061} + 0.485 \cdot 10^{-10} Re_1^{-0.234} Re_2^{1.92} (1 + 9.57 Re_1^{-0.122}). \quad (27)$$

Ці співвідношення вірні, коли $20 < Re_1 < 100$ та $0 \leq Re_2 \leq 10^4$. Розрахунок по запропонованим формулам (24)-(27) задовільно погоджується з експериментальними даними різних авторів.

Другий тип хвиль відповідає солітонному розв'язку рівняння (19). Результати чисельних розрахунків профілю солітону показані на рис. 2. Звідкіль випливає також, що коли росте швидкість газу, то росте і амплітуда хвилі, а це свідчить про механізм нестійкості Кельвіна-Гельмгольца.

Проведено бібліографічний огляд теоретичних робіт, які стосуються вивчення процесів ТМО при випаровувальному охолодженні рі-

дини в контактному пристрої ТМА. Встановлено, що методика досліджень є досить розвинутою для плоских насадочних елементів, без обліку хвилеутворення на поверхні рідинної плівки. Але приймаючи до уваги ті особливості двофазних плівкових і плівково-струминних течій, які мають місце в реальних умовах (хвилі на поверхні поділу, течії по складнопрофільованим поверхням з регулярною конфігурацією, різні схеми контактування матеріальних потоків та ін.) ця методика розрахунку гідродинаміки та процесів ТМО потребує подальшого розвитку.

Процеси випаровувального охолодження при двофазній плівковій течії у плоскому каналі контактного пристрою описуються наступною системою рівнянь (у формі рівнянь приграничного шару, для прямої течії фаз)

$$\begin{aligned} u_1(y) \frac{\partial t}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \\ u_2(y) \frac{\partial \theta}{\partial x} &= a_2 \frac{\partial}{\partial y} \left[(1 + a_1/a_2) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] \\ u_2(y) \frac{\partial p}{\partial x} &= DR_p T \frac{\partial}{\partial y} \left[(1 + D_1/D) \frac{\partial p}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (28)$$

тут швидкість u_1 та u_2 визначається співвідношеннями (16), (17).

Граничні умови при цьому такі:

$$\begin{aligned} \text{на стінці при } y = 0 \quad \partial t / \partial y &= 0; \\ \text{на осі каналу при } y = r \quad \partial \theta / \partial y = 0, \quad \partial p / \partial y &= 0; \end{aligned} \quad (29)$$

умови спряження на поверхні поділу $y = h$

$$\lambda_1 \partial t / \partial y = (\lambda_2 + \lambda_T) \partial \theta / \partial y + r_D \rho_B / \rho_B (D + D_T) \partial p / \partial y, \quad p = p''(t_1). \quad (30)$$

Задача (28)-(30) зводиться до одновимірної. Якщо провести осереднення вихідних рівнянь (38) по товщині відповідних потоків, то для середніх значень

$$\bar{t}(x) = \frac{\rho_1}{q_1} \int_0^h u_1 t \, dy, \quad \bar{\theta}(x) = \frac{\rho_2}{q_2} \int_0^r u_2 \theta \, dy, \quad \bar{p}(x) = \frac{\rho_2}{q_2} \int_0^r u_2 p \, dy. \quad (31)$$

зважаючи на закони Ньютона $q_a = a_2(t_1 - \theta)$ та Дальтона $q_p = r_D \rho_{\text{пов}} \beta_2(p'' - \bar{p})$, а також граничні умови (29), (30), дістанемо наступну систему рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{t}}{dx} &= a_1(\bar{\theta} - t_1) + b_1(\bar{p} - p''), \quad a_1 = \frac{a_2}{c_1 q_1}, \quad b_1 = \frac{r_D \beta_2}{c_1 q_1} \\ \frac{d\bar{\theta}}{dx} &= a_2(t_1 - \bar{\theta}), \quad \frac{d\bar{p}}{dx} = b_2(p'' - \bar{p}), \quad a_2 = \frac{a_2}{c_2 q_2}, \quad b_2 = 1.61 \frac{\rho_B \beta_2}{q_2}, \end{aligned} \quad (32)$$

Для її розв'язку потрібно задати величини α_2 , β_2 , $p'' = p''(t_1)$ і граничні умови. Запроваджуються наступні припущення: по-перше, температура на поверхні рідини дорівнює її середньому значенню по товщині шару $t_1 = \bar{t}$, по-друге, матимемо аналогію процесів тепло- та масообміну, яка виражається наближеним співвідношенням Льюїса. Згідно Вермана це зображається рівністю $Sh = 0.95 Nu$. (33)

Для плоских елементів насадки, без обліку хвилеутворення, число Нуссельта визначається за формулою Михеева $Nu = 0.021 Re_z^{0.8} Pr^{0.43}$ (34)

Скрізь в подальшому передбачається лінійна апроксимація

$$p'' = m + n t. \quad (35)$$

Для однозначної розв'язності рівнянь (32) необхідно задати умови на вході в апарат:

$$\text{для протитечії: при } x=0 \quad t=t_0, \quad \theta=\theta_0, \quad p=p_0; \quad (36)$$

$$\text{для протитечії: при } x=0 \quad t=t_0; \quad \text{при } x=H \quad \theta=\theta_H, \quad p=p_H. \quad (37)$$

Аналітичні розв'язки задач (32)-(36) і (32)-(35), (37) відомі і містяться у ряді робіт. Результати розрахунку температури рідини на виході з апарата в умовах прямо- і протитечії фаз без врахування хвилеутворення зображені на рис. 1 (крива 1). При наявності хвиль на поверхні плівки рідини течія газу в таких умовах можна розглядати як його рух в каналі з шорсткими стінками, причому висота елементів шорсткості і віддаля між ними визначаються відповідно амплітудою (27) та довжиною хвилі (25). Вплив хвилеутворення

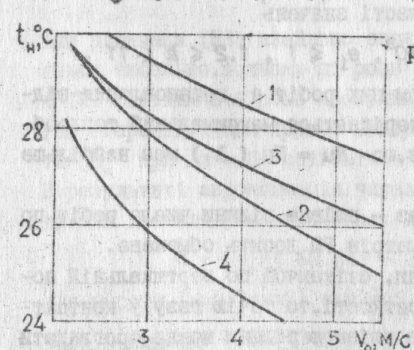


Рис. 1. Залежність температури рідини t_n від швидкості v_0 газу:
1 - плоский лист, без врахування хвилеутворення (прямо- і протитечії);
2 - плоский лист, враховуючи хвилеутворення (протитечії);
3 - плоский лист, враховуючи хвилеутворення (прямотечії);
4 - плоский лист з РП.

на процеси випаровувального охолодження показано кривою 2 (Рис. 1). При розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в цьому випадку використовують співвідношення Кадера (33). На рис. 1 видно, що хвилеутво-

рення значно інтенсифікує процеси охолодження. Отже, при використанні елементом насадки плоского листа необхідно враховувати хвильовий характер плівкової течії.

Глава VI. Гідродинаміка і тепломасообмін при течії плівки рідини по вертикальній поверхні з РШ.

Одним з перспективних методів інтенсифікації процесів ТМО в контактному пристрої плівкової апаратури є утворення штучної шорсткості на робочій поверхні насадочних елементів. Питання про вплив штучної шорсткості на процеси ТМО обговорювалось у ряді робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників. Наприклад, при однофазній течії у каналі з стінками, які мають РШ, коефіцієнт тепловіддачі можна визначити за формулами Кадера

$$Nu = \frac{\alpha_2 d_{\phi}}{\lambda_2} = \frac{Re_2 \sqrt{\xi/8}}{3.03 \ln(Re_2 \sqrt{\xi/8}) + M + 9.57 \sqrt{\xi/8}}, \quad (38)$$

$$\text{де } \xi = 8 [2.5 \ln(d_{\phi}/2e) + B_0(\sigma) - 3]^{-2},$$

$$M = 4.9 k_+^{1/4} - 3.03 \ln k_+ + B(\sigma) - 5.86,$$

$$d_{\phi} = d^2 [(1-2e_1)^2 + 2e_1(k-2)^2(27-58e_1+2e_1k)/243k],$$

$$k_+ = e_1 Re_2 \sqrt{\xi/8}, \quad e_1 = e/d, \quad k = p/e, \quad \sigma = (k-2)^{2/3} k^{1/3} (1-2e_1)^2,$$

$$B_0(\sigma) = 10 \exp(-0.3 \sigma) + 1.5 \sigma^{0.45}, \quad B(\sigma) = 1.79 \sigma^{0.45},$$

які можуть бути застосовані в області значень

$$4 \cdot 10^3 \leq Re_2 \leq 4 \cdot 10^6, \quad 3 \leq k_+ \leq 6 \cdot 10^3, \quad e_1 \leq 1, \quad 1.2 \leq k \leq 11.$$

Найбільш істотним результатом цих робіт є встановлення відношення $k = p/e$, при якому спостерігається максимальний теплообмін. З співвідношень (38) випливає, що $Nu = Nu(k)$ має найбільше значення коли $k = 10 + 11$.

Але для двофазної системи газ - плівка рідини число робіт по застосуванню та оптимізації параметрів РШ досить обмежене.

Так як поверхня плівки рідини, стікаючої по вертикальній поверхні з РШ, повторює рельєф шорсткості, то течія газу у контактному пристрої ТМА при взаємодії з плівкою рідини можна розглядати як його рух в каналі з стінками, які мають РШ з елементами добре обтічної форми і висота виступів такої шорсткості визначається ам-

плітудою стоячої хвилі.

Для визначення шуканої амплітуди розглядається течія плівки рідини по вертикальній поверхні з РШ в умовах контакту з потоком газу. Якщо висота виступів шорсткості мала ($e < \delta$ - пісочна шорсткість), то має місце суперпозиція прогресивних та стоячих хвиль. У цьому випадку відбувається інтенсифікація головним чином в рідинній фазі. Найбільше практичне значення, в зв'язку з інтенсифікацією процесів випаровувального охолодження, має велика висота виступів шорсткості ($e \geq \delta$); при цьому відбувається збільшення коефіцієнтів переносу в газовій фазі, але при цьому може виникнути небезпека інтенсивного каплевиносу, і тому необхідно враховувати зв'язок між висотою виступів e та найбільшою швидкістю газу v_{gr} (14).

Так як форма елементів шорсткості слабо впливає на інтегральні характеристики двофазної системи, то для простоти дослідження розглядається плівка рідини, яка стікає по вертикальній поверхні з елементами шорсткості циліндричної форми. Область формування потоку, яка відповідає одному періоду шорсткості, розбивається на три області 1 - 3 (рис. 3). На плоских елементах 1 і 3 вільна поверхня $h(x)$ визначається з рівняння

$$h^3 h''' + We h' (48 + 2\tau_1 h^2 - \tau_1^2 h^4) / 40 + We h^3 / Fr - 1.5 We (2 + \tau_1 h^2) / Re_1 = 0, \quad (39)$$

а у циліндричній області 2 для $h(\varphi)$ має місце рівняння

$$h^3 h''' / We + h' (48 + 2\tau_1 h^2 - \tau_1^2 h^4) / 40 + h^3 \sin \varphi / Fr - 3(2 + \tau_1 h^2) / 2e Re_1 = 0. \quad (40)$$

Для рівняння (52) знайдено аналітичний розв'язок, а (53) розв'язується чисельно, причому ці розв'язки спрягаються на бісектрисах АВ і CD. Періодичний розв'язок, який відповідає РШ, будується з допомогою ітерацій, і цей процес завершується, коли значення функцій h та h' при $x = 0$ збігаються з їх значеннями при $x = p$. В результаті апроксимація чисельних даних методом найменших квадратів дає наступні значення: для середньої товщини плівки

$$\delta = Re_1 / (63.643 + 2.928 Re_1) \quad (41)$$

для висоти (амплітуди) стоячої хвилі

$$e_{cn} = Re_1 / (1 + 0.773 Re_1) + 2.576 \cdot 10^{-4} Re_1^{-2.69} Re_2^{1.771}, \text{ мм.} \quad (42)$$

Ці співвідношення справедливі при $e = 0.8 + 1 \text{ мм}$, $k = 8 + 12$, $v_0 = 0 + 5 \text{ м/с}$, $40 \leq Re_1 \leq 100$.

xv 12 15

Процеси ТМО для двофазної плівкової течії при наявності РШ визна-

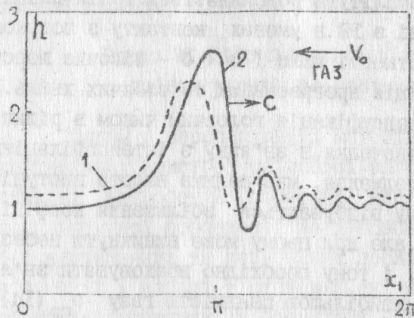


Рис.2. Профіль солітона

1 - $v_0 = 1$ м/с; 2 - $v_0 = 4$ м/с.

чаються, як і раніше, системою рівнянь (32), а коефіцієнт теплообміну - з формул Кадера (38). На рис.1 (крива 4) зображено залежність температури рідини на виході з апарата t_H від швидкості v_0 газу. Елемент насадки - плоский лист з РШ ($e = 0.8$ мм, $p = 10$ мм).

Глава VII. Струминна течія рідини у випадні вертикальної гофрованої поверхні та міжфазний теплообмін.

Наявність РШ на плоских елементах насадки при великій висоті виступів, приводить до інтенсифікації процесів переносу, але при цьому в області сильної гідродинамічної взаємодії фаз має місце також і сильний каплевинос. Щоб уникнути цього необхідно створити поперечні капілярні сили, які утримували б рідину у контактному пристрої, без зниження при цьому ефективності РШ. Цього можна досягнути, наприклад, шляхом гофрування елементів насадки. Рідина під дією сил поверхневого натягу збирається до западини такої поверхні і в подальшому її рух має плівково-струминний характер. Розглядається струминна течія рідини по западинній частині гофрованої поверхні, рівняння якої можна апроксимувати квадратичною залежністю $y = f(z) = 2az^2$. Зневажаючи циркуляцію рідини у поперечному перерізі струменя, а також ефектом змочування, одержуємо для подовжньої швидкості та найбільшої товщини струменя наступні значення

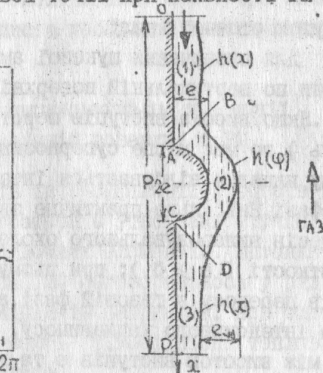


Рис.3. Схема течії плівки рідини по елементу пористості циліндричної форми.

$$u_1 = -gy^2/2v_1 + y(\rho_1 gh - \tau_2)/\mu_1 + f(0.5\rho_1 gf - \rho_1 gh + \tau_2)/\mu_1, \quad (43)$$

$$h = h_0 + \tau_2/2\rho_1 g, \quad h_0 = (4.64 \sqrt{\alpha} Q_1 v_1/g)^{2/7}, \text{ мм},$$

де τ_2 - дотичне напруження з боку газу; Q_1 - об'ємна витрата рідини у струмені, що зробило можливим визначити сухий та змочений периметр гофрованої поверхні (рис.4)

$$l_0 = P^2 [\ln(\Delta + \sqrt{1 + \Delta^2}) + \Delta \sqrt{1 + \Delta^2}] / 16E, \quad \Delta = 4\sqrt{2hE}, \quad \Delta_1 = 4E/P, \quad (44)$$

$$l_1 = P\sqrt{\pi/2E}, \quad l_2 = P^2 [\ln(\Delta_1 + \sqrt{1 + \Delta_1^2}) + \Delta_1 \sqrt{1 + \Delta_1^2}] / 16E - l_0.$$

При тепловому та аеродинамічному розрахунку контактної пристрої, у випадку прямо- або протиточної течії газу, для продольно-гофрованих елементів насадок необхідно визначити еквівалентний діаметр. Рівняння гофрованої поверхні у цьому випадку апроксимується синусоїдою. В результаті, при ширині b каналу еквівалентний діаметр дорівнює

$$d_{ex} = \frac{16b(1+\alpha)}{5\alpha^2 + 6\alpha + 5}, \quad \alpha = \sqrt{1 + (\pi E/P)^2}. \quad (45)$$

При наявності РШ на гофрованій поверхні для визначення найбільшої товщини струменя застосовується рівняння балансу сил, діючих на елемент струменя. В результаті одержуємо

$$h = h_0 + (3\tau_2/\rho_1 g) \cdot (\Delta_0^3/(9\Delta_0^3 - 2B\sqrt{1 + \Delta_0^2})) \cdot l, \quad \Delta_0 = 2\sqrt{2ah_0}, \quad (46)$$

де $h_0 = 0.7989 Q_1^{0.3277}$, мм; $\tau_2 = \lambda_2 \rho_2 v_0^2/2$; $B = 176.3 \lambda_1 \alpha^5 Q_1^2$.

При розгляді процесів ТМО у контактному пристрої з гофрованими елементами треба враховувати сухі та змочені ділянки (рис.4).

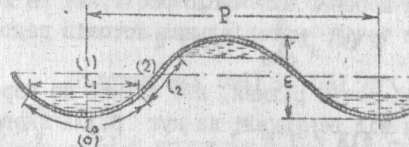


Рис.4. До розрахунку ТМО на гофрованій поверхні.

Уся поверхня теплообміну, відповідна одному періоду, розбивається на три області:

(0) - периметр ції поверхні l_0 , тут відбувається теплопередача від води до повітря через стінку; (1) - периметр ції області l_1 , тут вода і повітря знаходяться в безпосередньому контакті і ця поверхня є областю ТМО; (2) - протяжність ції області l_2 і ця ділянка гофрованої поверхні є змоченою, тут має місце тепловіддача від стінки до повітря. Виходячи з рівнянь теплового балансу, одержано, як і раніше, рівняння (32), коефіцієнти яких

є

відповідно дорівнюватимуть

$$\begin{aligned} a_1 &= (\alpha_2 l_1 + k_\alpha l_0 + K) / g_1 c_1, & b_1 &= \beta_2 \gamma_D l_1 / g_1 c_1 \\ a_2 &= 2(\alpha_2 l_1 + k_\alpha l_0 + K) / g_2 c_2, & b_2 &= 3.215 p_\beta l_1 \beta_2 / g_2. \end{aligned} \quad (47)$$

де $k_\alpha = 1 / (1/\alpha_0 + \delta_w/\alpha_w + 1/\alpha_1)$, $m = (2\alpha_0/\lambda_w \delta_w)^{1/2}$,

$$K = \sqrt{2\alpha_0 \lambda_w \delta_w} \operatorname{th}(m l_2 / 2) [1 + k_\alpha (1/\alpha_0 - 1/\alpha_1)].$$

На рис.5 зображено результат розрахунку температури рідини на виході з апарата t_n в залежності від швидкості газу v_0 . Розрахунок здійснювався за допомогою співвідношень (47), а при наявності РШ, коефіцієнт тепловіддачі визначається з формул Кадера (38).

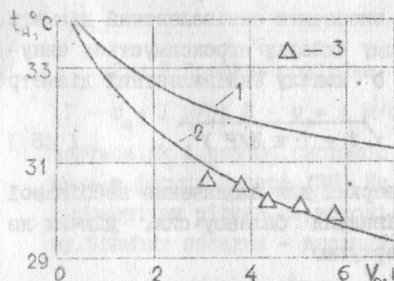


Рис.5. Температура рідини на виході з апарата (протитечія): 1 - гладка гофрована поверхня; 2 - гофрована поверхня з РШ; 3 - експеримент (Сікорська).

Рис.5. Температура рідини на виході з апарата (протитечія): 1 - гладка гофрована поверхня; 2 - гофрована поверхня з РШ; 3 - експеримент (Сікорська).

Глава VIII. Тепломасообін при перехресному тоці фаз.

Зараз широке розповсюдження одержали плівкові апарати з перехресноточною схемою контактування фаз, такі апарати мають ряд конструктивних та технологічних переваг. Але число робіт, які зв'язані з дослідженням даної схеми течії матеріальних потоків надто обмежене.

Під дією потоку газу лінії течії рідини, яка стікає по вертикальній поверхні, відхиляються від вертикалі на кут β , для якого $\operatorname{tg} \beta = 2\tau_2 / \rho_1 g l$, де товщина шару рідини визначається за формулою

$$h = h_N - \tau_2 H / (2\rho_1 g l). \quad (48)$$

Якщо провести відповідні усереднення рівнянь конвективного ТМО при перехресному контактуванні фаз, то одержимо наступну систему рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial x} &= a_1 (\theta - t) + b_1 (p - p'') \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} &= a_2 (t - \theta), \quad \frac{\partial p}{\partial z} = b_2 (p'' - p), \end{aligned} \quad (49)$$

коефіцієнти якої a_1, b_1, a_2, b_2 такі самі, як і для (32).

Граничні умови у цьому випадку такі:

$$\text{при } x = 0 \quad t = t_0; \quad \text{при } z = 0 \quad \theta = \theta_0, \quad p = p_0. \quad (50)$$

Пропонується наступний метод розв'язування даної задачі.

Розв'язок задачі (49)-(50) шукається у вигляді

$$\begin{aligned} t(x, z) &= t_1(z) + e^{-ax} T(x, z), \quad a = a_1 + b_1 n \\ \theta(x, z) &= \theta_1(z) + e^{-ax} Q(x, z) \\ p(x, z) &= p_1(z) + e^{-ax} P(x, z), \end{aligned} \quad (51)$$

де нові невідомі функції визначаються з розв'язку задач

$$\begin{aligned} at_1 &= a_1 \theta_1 + b_1 p_1 - b_1 m & \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 Q + b_1 P \\ a \theta_1 / dz + a_2 \theta_1 &= a_2 t_1 & \frac{\partial Q}{\partial z} + a_2 Q &= a_2 T \\ dp_1 / dz + b_2 p_1 &= b_2 n t_1 + b_2 m, & \frac{\partial P}{\partial z} + b_2 P &= b_2 n T, \end{aligned} \quad (52)$$

при $z=0 \quad \theta_1 = \theta_0, \quad p_1 = p_0$ при $x=0 \quad T=t_0-t_1, \quad z=0 \quad Q=P=0$.

Розв'язок (52) представляється наступними співвідношеннями:

$$t_1 = \eta_0 + \zeta_0 e^{-bz}, \quad \theta_1 = \eta_1 + \zeta_1 e^{-bz}, \quad p_1 = \eta_2 + \zeta_2 e^{-bz}, \quad b = (a_1 b_2 + a_2 b_1 n) / a, \quad (53)$$

де η_1, ζ_1 - відомі константи;

$$Q = a_2 \int_0^z T e^{-a_2(z-\zeta)} d\zeta, \quad P = b_2 n \int_0^z T e^{-b_2(z-\zeta)} d\zeta, \quad (54)$$

а функція $T(x, z)$ задовольняє інтегро-диференціальному рівнянню

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \int_0^z T(x, \zeta) K(z-\zeta) d\zeta, \quad K(z) = a_1 a_2 e^{-a_2 z} + b_1 b_2 n e^{-b_2 z}, \quad (55)$$

крім того при $x = 0 \quad T = t_0 - t_1(z)$.

Розв'язок рівняння (55) шукається у вигляді

$$T(x, z) = \sum_{k=0}^{\infty} Z_k(z) x^k. \quad (56)$$

Підстановка (56) у (55) дає наступні значення для послідовних наближень

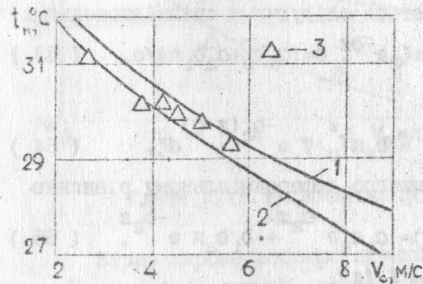
$$Z_{n+1}(z) = \frac{1}{n+1} \int_0^z Z_n(\zeta) K(z-\zeta) d\zeta, \quad Z_0(z) = t_0 - t_1(z). \quad (57)$$

Отже, вирази (51), (53), (54), (56), і (57) є розв'язком задачі (49)-(50).

При перехресному контактуванні фаз найбільша інтенсивність процесів ТМО має місце для гофрованих елементів пасадки. Розглянута течія струменя рідини по випадінні гофрованої поверхні в умовах перехресного контактування з потоком газу. З врахуванням циркуляції течії в поперечному перерізі струменя одержано розподіл швидкостей.

а також рівняння вільної поверхні рідини. Показано, що в діапазоні зміни параметрів $P = 8 + 12$ мм, $E = 2 + 4$ мм, $p = 10 + 12$ мм, $e = 0.8 + 1$ мм, $0 \leq v_0 \leq 10$ м/с з достатньою, з практичної точки зору, точністю можна покласти, що $h = h_0$, де h_0 знаходимо з (46). Тоді сухі і змочені частини гофрованої поверхні визначаються співвідношеннями (44).

Рівняння ТМО, які описують процеси випаровувального охолодження на гофрованих елементах насадки при перехресному контактуванні фаз, як і раніше, мають вигляд (49), а коефіцієнти a_1, b_1, a_2, b_2 системи визначаються виразами (47). Число Нусельта і ефективний діаметр обчислюються за формулами Кадера (38). В результаті розподілу температур рідини і газу t, θ , а також розподілу парціального тиску пари p в шарі насадки визначаються співвідношеннями (51). Результати розрахунку температури t_n рідини на виході з апарата



у залежності від швидкості v_0 газу зображено на рис. 6. Розрахунок здійснюється, враховуючи друге наближення.

Рис. 6. Температура t_n рідини на виході з апарата (перехресний ток):
1 - гладка гофрована поверхня;
2 - гофрована поверхня з РП;
3 - експеримент (Сікорська).

Глава IV. Теоретичне дослідження тепломасовіддачі в процесах непрямого випаровувального охолодження.

В останній час одержали широке впровадження плівкові повітроохолоджувачі непрямого випаровувального типу. Наприклад, принцип непрямого випаровувального охолодження в кондиціонерах забезпечує значну економію (в 3-4 рази в порівнянні з парокompресорними охолоджувачами) енергії. Разом з тим дослідження, які присвячені дослідженню процесів ТМО у контактних пристроях таких апаратів відсутні.

В непрямо-випаровувальному ТМА використовується багатоканальна насадочна структура, що складається з "сухих" і "вологих" каналів. Охолодження основного повітряного потоку в "сухих" каналах досягається дякуючи випаровувальному охолодженню плівки рідини, яка стікає по зовнішній поверхні цих каналів в умовах контакту з допоміж-

ним потоком. Основний і допоміжний потоки повітря можуть мати по відношенню до стікаючої плівки рідини різні напрямки руху. На практиці найбільше застосування одержали дві схеми течії матеріальних потоків:

- 1) поперечно-прямоточна (протиточна) схема (по відношенню до стікаючої плівки основний потік рухається перехресним чином, а допоміжний прямоточом чи протиточом);
- 2) поперечно - поперечноточна схема (обидва повітряні потоки рухаються перехресним чином).

Для поперечно-поперечноточної схеми потоків процеси непрямого випаровувального охолодження в плоскопаралельному насадочному модулі описуються наступними рівняннями

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a_1 (\theta - t) + b_1 (p - p'') + c_1 (\theta - t), \quad a_1 = \frac{a_2}{c_p q_1} \quad (58)$$

$$\frac{\partial \theta_B}{\partial z} = a_2 (t - \theta_B), \quad \frac{\partial p}{\partial z} = b_2 (p'' - p), \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = c_2 (t - \theta),$$

де $b_1 = \gamma_D \beta_2 / c_p q_1$, $c_1 = k_a / c_p q_1$, $a_2 = a_2 / c_p q_B$, $b_2 = 1.61 P_{cp} \beta_2 / q_B$, $c_2 = k_a / c_p q$; $q_1 = \rho_1 u_0 h$ - густина зрошення; $2q_B = \rho_2 u_B (b_B - h)$, $2q = \rho_2 u_0 b_0$ - витрати повітря, які приходяться на одиницю ширини каналу.

Граничні умови (на вході) мають вигляд:

при $x = 0$ $t = t_0$; при $z = 0$ $\theta_B = \theta_{B0}$, $p = p_0$, $\theta = \theta_0$. (59)

Розв'язок задачі (58) - (59) зображається наступним чином.

Вводиться нова змінна $\xi = x + z$, яка переводить систему (58) в звичайні диференціальні рівняння. Відповідне характеристичне рівняння з кубічним

$$\lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 = 0.$$

Аналіз розв'язку цього рівняння показує, що його корені являються дійсними від'ємними числами x_2, x_3, x_4 . В результаті загальний розв'язок (58) -

$$t(\xi) = g_1 + \sum_{i=2}^4 g_i e^{x_i \xi}, \quad \theta(\xi) = g_1 + c_2 \sum_{i=2}^4 \frac{g_i}{x_i + a_2} e^{x_i \xi} \quad (60)$$

$$\theta_B(\xi) = g_1 + a_2 \sum_{i=2}^4 \frac{g_i}{x_i + a_2} e^{x_i \xi}, \quad p(\xi) = m + n g_1 + b_2 n \sum_{i=2}^4 \frac{g_i}{x_i + b_2} e^{x_i \xi}.$$

Постійні g_i ($i = 1, 2, 3, 4$) визначаються з умов:

при $x = 0$ $t(0) = t_0$; при $z = 0$ $\theta_B = \theta_{B0}$, $p = p_0$, $\theta = \theta_0$, котрі випливають з (59) шляхом осереднення по довжині l і висоті h насадочного модуля. В результаті одержуємо наступну систему рів-

$$\begin{aligned} \text{нянь відносно } g_1 \\ g_1 + \sum_{i=2}^4 e l_i g_1 = t_0, g_1 + a_2 \sum_{i=2}^4 \frac{e h_i}{x_1 + a_2} g_1 = \theta_{\text{BO}}, e l_1 = \frac{e^{x_1} - 1}{x_1} \quad (61) \\ n g_1 + b_2 \sum_{i=2}^4 \frac{e h_i}{x_1 + b_2} g_1 = p_0 - m, g_1 + c_2 \sum_{i=2}^4 \frac{e h_i}{x_1 + c_2} g_1 = \theta_0, e h_1 = \frac{e^{x_1} - 1}{x_1} \end{aligned}$$

Таким чином, розв'язок задачі (58), (59) визначається співвідношеннями (60), (61).

Якщо насадочними елементами застосовують гофровані поверхні з РШ, то, як і раніше, справедливі рівняння (58), а коефіцієнти цих рівнянь відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned} a_1 = \frac{\alpha_B l_1 + k_a}{g_p c_p}, b_1 = \frac{\beta_2 r_{D1}}{g_p c_p}, c_1 = \frac{k_a l_0 + k_0}{g_p c_p} \quad (62) \\ a_2 = \frac{2(\alpha_B l_1 + k_B)}{g_B c_r}, b_2 = 3.215 \frac{p_{cp} \beta_2 l_1}{g_B}, c_2 = \frac{2(k_a l_0 + k_0)}{g_0 c_r}, \\ k_0 = M_w \left[\frac{\alpha_0 - \alpha_B}{\alpha_0 + \alpha_B} + k_a \left(\frac{1}{\alpha_0} - \frac{1}{\alpha_1} \right) \right], k_B = \frac{2M_w \alpha_B}{a_B}, M_w = \lambda_w \delta_w m t h m l_2. \end{aligned}$$

Отже, і в цьому випадку, при наявності гофрованих насадочних елементів, процеси ТМО можуть бути досліджені з допомогою розглянутого метода.

Глава X. Інженерна методика розрахунку насадочного модуля плівкового апарата прямого й непрямого випаровувального охолодження.

Розрізняють дві основні задачі розрахунку насадочного шару плівкового апарата. Пряма задача - за даними витратами й основними параметрами для води і повітря, а також по відомим основним розмірам насадки та її елементів визначити параметри води та повітря на виході з апарата. Обернена задача - по заданим витратам охолоджуваного середовища визначити основні розміри насадочного модуля, які б забезпечили на виході з апарата заданий перепад температур.

Розглядаються основні характеристики плівкового апарата. Густина зрошення, як правило, змінюється в границях

$$q_p = G_p / (3600 S) = 3.5 + 5 \text{ кг/(м}^2 \text{с)}, \quad (63)$$

де G_p - масова витрата рідини, кг/г; S - площа горизонтального перерізу насадки.

Другою важливою характеристикою плівкового ТМА є відносна витрата повітря $\lambda = G_r / G_p = \rho_r V_r / q_p$, де швидкість газу V_r повинна бути меншою ніж гранична (14). З практичної точки зору $V_r = k v_*$, де $k = 0.5 + 0.65$. В результаті

$$\lambda = 1 + 1.2. \quad (64)$$

Для елементів насадки використовуються гофровані листи з РШ, параметри яких ($k = p/e$, $K = P/E$)

$$e = 1 \text{ мм}, k = 8 + 12, E = 3.5 \text{ мм}, K = 2.6. \quad (65)$$

Згідно експериментальних даних ці значення забезпечують максимальну інтенсивність процесів переносу.

Для оцінки якості роботи охолоджувача використовується величина коефіцієнта ефективності η_0 , що являє собою відношення дійсного підохолодження середовища в охолоджувачі Δt до граничного підохолодження в даних умовах $\Delta t_{\text{ад}}$

$$\eta_0 = (t_0 - t_n) / (t_0 - \tau). \quad (66)$$

В зв'язку з оцінкою ефективності охолоджуючого пристрою розглянемо границі охолодження рідини й газу. Процес випаровування рідини, при якому все тепло, передане рідині з боку повітря, витрачається на випаровування останньої і знову повертається в повітря з паром і називають адіабатичним випаровуванням.

Реально умови адіабатичного випаровування в зрошувачі плівкового апарата можна одержати шляхом рециркуляції рідини. Рідина з температурою на виході $t_{\text{вих}}$ подається в верхню частину апарата на вхід; через деякий час температура рідини встановиться, так що температура її на вході $t_{\text{вх}}$ буде дорівнювати температурі виходу, отже $t_{\text{вх}} = t_{\text{вих}} = \tau$. Температура τ і є та границя, нижче якої охолодження води в цих умовах неможливе.

Розглянемо наближений метод визначення границі охолодження τ при різних схемах руху матеріальних потоків.

При прямооточному контактуванні рідини й газу, враховуючи, що температура рідини в насадочному шарі постійна $t = \tau$, з (32) випливає

$$a_1 (\bar{\theta} - \tau) + b_1 (\bar{p} - m - n\tau) = 0 \quad (67)$$

$d\theta/dx = a_2 (\tau - \theta)$, $dp/dx = b_2 (m + n\tau - p)$, де $\bar{\theta}$, $\bar{p}$ середні значення температури повітря θ і парціального тиску p по висоті апарата. Враховуючи умови при $x = 0$ $\theta = \theta_0$ і $p = p_0$ з (67) знаходимо шукану границю охолодження

$$\tau = \frac{a_1 \theta_0 a h + b_1 (p_0 - m) b h}{a_1 a h + b_1 n b h}. \quad (68)$$

де $a h = (1 - \exp(-a_2 H)) / a_2 H$, $b h = (1 - \exp(-b_2 H)) / b_2 H$, H - висота насадки. Аналогічно визначається границя охолодження і при інших схемах руху потоків. Для протитоку має місце (68), де θ_0 і

p_0 - параметри зовнішнього повітря.

При перехресному контактуванні (l - довжина насадки)

$$\tau = \frac{a_1 \theta_0 a l + b_1 (p_0 - m) b l}{a_1 a l + b_1 n b l} \quad (69)$$

тут $a l = (1 - \exp(-a_2 l)) / a_2$, $b l = (1 - \exp(-b_2 l)) / b_2$.

При непрямому випарувальному охолодженні для поперечно-поперечної схеми течії потоків

$$\tau = \frac{a_1 \theta_{\text{во}} a l + b_1 (p_0 - m) b l + c_1 \theta_0 c l}{a_1 a l + b_1 n b l + c_1 c l} \quad c l = \frac{1 - e^{-c_2 l}}{c_2} \quad (70)$$

а границя охолодження основного потоку повітря при цьому дорівнює

$$\theta_1 = \tau + (\theta_0 - \tau) \exp(-c_2 l) \quad (71)$$

Прямий розрахунок плівкових апаратів для різних схем і способів контактування розглянуто раніше при дослідженні ТМО в контактному пристрої.

Розглядається методика розрахунку основних розмірів насадки на прикладі протиточної вентиляторної градирні.

Дано: G_p^v , м³/г - об'ємна витрата рідини; початкова (на вході) температура води t_0 , °C; параметри зовнішнього повітря: температура θ_n , °C; відносна вологість ϕ_n , % (парціальний тиск пари p_n , Па). Визначити: основні розміри насадки (l , H - довжина і висота; b - відстань між листами; n - кількість листів), які забезпечують задану температуру води, що виходить з градирні; вибрати тип вентилятора і знайти ефективність η_0 спроектованого апарата. Розрахунок. Задамо фронтальну густину зрошення q_p з інтервалу (63), тоді площа горизонтального перерізу S насадки дорівнює

$$S = \rho_1 G_p^v / (3600 q_p), \text{м}^2 \quad (72)$$

Нехай відносна витрата повітря знаходиться в діапазоні (64),

$$\text{тоді масова витрата повітря } G_r = \lambda \rho_1 G_p^v \quad (73)$$

$$\text{а швидкість газового потоку } v_0 = G_r / (3600 \rho_2 S) \quad (74)$$

Разом з тим ця швидкість v_0 повинна бути менше граничної v_{rp} , яка визначається співвідношенням (14).

Як елементи насадки використовуються плоский чи гофрований з РП, геометричні характеристики якого з діапазону (65). Задамо далі деяке початкове значення $b = b_0$ (відстань між листами) і потім, застосовуючи формули Кадера, знаходимо ефективний діаметр d , коефіцієнт опору ξ , а також числа Рейнольдса Re_2 і Нусельта Nu для повітряного потоку. По одержаним даним можна визначити коефіцієнти a_1 , b_1 , a_2 , b_2 рівнянь ТМО (32), для плоского листа

($a_2 < 0$, $b_2 < 0$) і для гофрованого листа (47).

Висота насадки H визначається з рівняння

$$t_n = t_* + c_1 \exp(\lambda_1 H) + c_2 \exp(\lambda_2 H)$$

Нарешті, обчислимо гідравлічні втрати в насадочному шарі $\Delta p_n = \xi H \rho_2 v_0^2 / (2 d)$, які складають 75 - 80 % загальних втрат

$$\Delta p_{\text{ап}} = 1.25 \Delta p_n$$

По даним значенням G_r і $\Delta p_{\text{ап}}$ вибирається тип вентилятора. Далі підбирається нове значення величини b і процедура обчислень знову повторюється до тих пір поки $\Delta p_{\text{ап}}$ не буде зіппадати з аеродинамічною характеристикою вентилятора $\Delta p_{\text{ап}} = \Delta p_{\text{вент}}$, де

$$\Delta p_{\text{вент}} = f(G_r^v).$$

Одержані на останній ітерації значення визначальних параметрів b_* , H_* , ξ_* , $d_{\text{эф}}$ та ін. і дають шукані характеристики апарата при його компоновці з даним вентилятором.

Завершуючи проектування протиточної вентиляторної градирні, знаходимо її ефективність η_0 (66), при цьому границя охолодження води обчислюється за формулою (68).

Аналогічним способом проводиться обернений тепловий розрахунок і при інших схемах руху потоків.

Глава XI. Інженерна практика

(практичне застосування результатів роботи).

Теоретичні результати, одержані в роботі, лягли в основу створення тепломасообмінного обладнання для рішення ряду задач зв'язаних з охолодженням рідин та газів. Розроблені комп'ютерні програми розрахунків контактних пристроїв з різними насадочними елементами дозволили створити оптимальні інженерні системи з підбором вентилятора з числа альтернативних. В результаті розроблено типорозмірний ряд протитачних та перехресноточних вентиляторних градирень, були створені непрямо-випарувальні повітроохолоджувачі для розв'язування задач технологічного значення (охолодження РЕА) й комфортного кондиціонування повітря, а також розроблено повітряно-випарувальний конденсатор для холодильних установок.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

І. Створено новий науковий напрямок в області холодильного машинобудування, що полягає в розробці методів розрахунку гідродинаміки та тепломасообміну в контактному пристрої ТМА в двофазній системі рідина - газ для плівкових і плівково-струминних течій на основі сучасних досягнень механіки рідини та газу, теорії тепло- і

масообміну, обчислювальної математики.

2. В результаті природної нестійкості течії плівки рідини на її поверхні виникають хвилі збурення, амплітуда яких зростає під впливом потоку газу; ці значні хвилювання є джерелом зносу крапельної вологи з апарата (нестійкість Кельвіна-Гельмгольца). Визначення граничного навантаження газової фази доцільно проводити згідно гідродинамічної стійкості потенціальних течій.

3. Для контактних пристроїв ТМА великої пропускної спроможності з плоскими і гофрованими, гладкими і пористими елементами коефіцієнти опору і теплообміну визначаються співвідношеннями Кадера (38) при різних схемах контактування матеріальних потоків.

4. Якщо елементами насадки є плоскі листи, то слід враховувати хвилюватий характер плівкової течії, яка інтенсифікує процеси випаровувального охолодження в такій же мірі як і лист з РШ. Параметри пористості (висота e і період p) визначаються при цьому амплітудою a (27) і довжиною λ (25) хвилі.

5. При використуванні ЕН поверхонь (плоских і гофрованих) з РШ підохолодження води після градирні нижче при протиточі, в порівнянні з прамоточною схемою течії фаз. Отже, протиток є більш кращим при організації руху потоків.

6. Для ЕН з РШ на поверхні плівки рідини утворюється регулярна система стоячих хвиль з довжиною, яка дорівнює віддалі між виступами, і амплітудою, що визначається співвідношенням (42). Амплітуда стоячої хвилі збільшується з ростом швидкості газу і при швидкостях порівнянних з граничною v_{gr} ця амплітуда значно відрізняється від висоти виступів пористості (до 30%). Ефективність РШ для двофазної системи газ - плівка рідини можна визначати на основі формули Кадера (33) з використанням виразу (42).

7. При зрошенні гофрованих поверхонь під дією капілярних сил рідин збирається у впадіннях і подальший її рух має плівково-струминний характер. Дослідження процесів випаровувального охолодження рідини в таких умовах слід проводити з врахуванням "сухих" і "зрошених" ділянок такої поверхні, розміри яких визначаються з (44).

8. Розроблені в роботі аналітичні методи розв'язування задач ТМО для плівкових і плівково-струминних течій в умовах прямого і непрямо-випаровувального охолодження фаз дозволяють проводити розрахунок основних характеристик потоків на виході з апарата з достатньою для інженерної практики точністю.

9. Запропонований наближений метод розрахунку границі охолодження води в умовах адіабатичного випаровування з достатньою точністю

дозволяє визначити температуру повітря на виході з апарата при прямому і непрямому-випаровувальному охолодженні.

10. Однозначна розв'язуваність задачі проектування насадок на основі математичного моделювання гідродинаміки та процесів випаровувального охолодження забезпечується завданням:

- 1) фронтальної густини зрошення q_p і відносного витратом повітря λ - для протиточної (прямоточної) градирні;
- 2) q_p , λ і швидкості течії повітря v_0 - для перехресноточної градирні;
- 3) q_p , λ і швидкості основної течії v_0 і допоміжної течії v_p повітря - для повітроохолоджувачів непрямо-випаровувального типу.

11. Розроблене математичне моделювання гідродинаміки і процесів ТМО є основою для прямого та оберненого розрахунку контактних пристроїв ТМА, а також для оптимального проектування плівкових водо- і повітроохолоджувачів.

Основний зміст роботи відтворено у публікаціях.

1. Чумак И.Г., Кириллов В.Х., Роговая С.Н. К вопросу о волновом течении тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1973. - Вып. 16. - С. 90-92..
2. Чумак И.Г., Кириллов В.Х., Роговая С.Н. Волновое течение пленки вязкой жидкости с учетом нелинейных касательных напряжений // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1974. - Вып. 19. - С. 23-26.
3. Чумак И.Г., Кириллов В.Х., Дымов М.И. Волновое течение тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1974. - Вып. 19. - С. 26-31.
4. Чумак И.Г., Кириллов В.Х., Дымов М.И. К вопросу об определении амплитуды волнового вертикального течения пленки // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1975. - Вып. 20. - С. 104-107.
5. Дымов М.И., Кириллов В.Х., Чертков И.Л. Теплообмен в тонком слое жидкости при регулярно-волновом режиме течения // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1975. - Вып. 21. - С. 50-54.
6. Кириллов В.Х., Дымов М.И. Определение длины участка интенсивного теплообмена между тонким слоем вязкой жидкости и газовым потоком // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1977. - Вып. 24. - С. 37-41.
7. Дымов М.И., Кириллов В.Х. Устойчивость течения тонкого жидкого слоя в теплообменниках пленочного типа // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1977. - Вып. 25. - С. 59-63.
8. Кириллов В.Х., Дымов М.И., Рожкова Л.Ф. Течение тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной гофрированной поверхности // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1978. - Вып. 27. - С. 44-47.
9. Кириллов В.Х., Чертков И.Л. Теплообмен в пленке жидкости, текущей по стенке с регулярной шероховатостью // Холодильн. техн. и технол.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1979. - Вып. 29. - С. 39-45.

10. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Волновое течение тонкого слоя вязкой жидкости по наклонной плоскости // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1982. - Вып. 35. - С. 117-122.
11. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Определение устойчивого волнового режима пленочного течения в случае малых расходов жидкости // Материалы конференции "Вычислительная математика в научно-техническом прогрессе". - Киев, 1982. - С. 157.
12. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Течение тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной гофрированной поверхности в условиях контакта с газовым потоком // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1985. - Вып. 40. - С. 28-32.
13. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Течение тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной гофрированной поверхности в условиях взаимодействия с газовым потоком // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1985. - Вып. 41. - С. 76-80.
14. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Дорошенко А.В. К расчету пленочных теплообменников аппаратов для холодильной техники // Холодильная техника. - 1985. - №. - С. 32-34.
15. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Дорошенко А.В. Устойчивость течения тонкого слоя вязкой жидкости на вертикальной поверхности в контакте с газовым потоком // Тез. докл. конференции "Метод функций А.М. Ляпунова в современной математике". - Харьков, 1986. - С. 126.
16. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Гайдай В.Г. Вопросы гидродинамики и проектирования пленочных теплообменников аппаратов для холодильной техники // Тез. докл. конференции "Интенсификация производства и применения искусственного холода". - Ленинград, 1986. - С. 14-15.
17. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Теплообмен в пленке жидкости, текущей по стенке с регулярной шероховатостью в контакте с газовым потоком // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1987. - Вып. 44. - С. 73-77.
18. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Тихоненко Л.Я. К теории течения тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности с конечной высотой выступов регулярной шероховатости // Тез. докл. конференции "Дифференциальные и интегральные уравнения и их приложения". - Одесса, 1987. - С. 115-116.
19. Малюков В.А., Холпанов Л.П., Дорошенко А.В., Кириллов В.Х. - Басаджа. - А.С. 1310011 (СССР). - БИ № 8. 1987.
20. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Дорошенко А.В. Определение параметров струи жидкости в поперечноточных теплообменниках аппаратов с продольно-гофрированными поверхностями // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1987. - Вып. 45. - С. 60-63.
21. Кириллов В.Х., Дорошенко А.В., Логачевский В.И. Особенности пленочного течения жидкостей по поверхностям с регулярной шероховатостью // Инж.-физ. журн. - 1988. - Т. 54. №. - С. 739-745.
22. Кириллов В.Х., Дорошенко А.В., Логачевский В.И. Компактная теплообменная аппаратура для пленочного контактирования газа и жидкости // Тез. докл. конференции "Современные машины и аппараты химических производств". - Чимкент, 1988. - С. 178-180.
23. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Дорошенко А.В. Определение поверхностей тепло- и массообмена в пленочных аппаратах с гофрированной басаджа // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1988. - Вып. 47. - С. 19-23.
24. Кириллов В.Х., Логачевский В.И., Титаренко Т.В. Расчет гидродинамики теплообменников аппаратов систем непрямого испарительного охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1989. - Вып. 48. - С. 19-24.
25. Кириллов В.Х., Грандов А.А., Дорошенко А.В. К расчету скорости вторичного уноса в сепараторах жидкостного типа // Инж.-физ. журн. - 1989. - Т. 56. №. - С. 842-843.

26. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Яцкарь И.Я., Дорошенко А.В. Численное моделирование течения пленки жидкости // Тез. докл. конференции "Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон". - М., 1989. - С. 20.
27. Кириллов В.Х., Туманский В.Н. Устойчивость плоскопараллельного течения тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности в контакте с газовым потоком. - Киев, 1989. - 16 с. - Деп. в
28. Кириллов В.Х., Дорошенко А.В., Логачевский В.И. Гидродинамика и теплообмен в пленочных аппаратах холодильных систем // Тез. докл. конференции "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода". - Одесса, 1989. - С. 68.
29. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Яцкарь И.Я. Численное моделирование течения пленки жидкости на насадочных элементах ТМА // Тез. докл. конференции "Пути интенсификации производства с применением искусственного холода". - Одесса, 1989. - С. 73.
30. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Яцкарь И.Я. Аналитический расчет теплообмена при пленочном испарительном охлаждении в режиме противотока // Тез. докл. конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах". - Ленинград, 1990. - С. 149-150.
31. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Дорошенко А.В. Особенности проявления регулярной шероховатости в пленочных противоточных тепло- и массообменных аппаратах // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1990. - Вып. 50. - С. 49-52.
32. Кириллов В.Х., Виттик В.Ф., Иванченко Ф.Н. Об одной сопряженной задаче теории теплообмена // Тез. докл. симпозиума "Метод дискретных особенностей в задачах математической физики". - Одесса, 1991. - С. 54-55.
33. Кириллов В.Х., Титаренко Т.В., Яцкарь И.Я. Моделирование пленочного течения по гладким и шероховатым поверхностям // Холодильн. техн. и техн.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1990. - Вып. 51. - С. 70-73.
34. Кириллов В.Х., Логачевский В.И. Неустойчивость плоскопараллельного течения пленки жидкости, текущей по вертикальной поверхности в контакте с турбулентным газовым потоком // Гидромеханика. Респ. межвед. сб. науч. трудов. - Киев, 1992. - Вып. 66. - С. 73-78.
35. Кириллов В.Х., Виттик В.Ф., Виттик А.В. Устойчивость ламинарного течения тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальной поверхности в контакте с турбулентным газовым потоком. - Киев, 1992. - 27 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 26.08.92. № 1332-Ук 92.
36. Кириллов В.Х., Виттик А.В. Косвенное испарительное охлаждение при прямоточном и противоточном течении фаз. - Киев, 1992. - 9 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 17.12.92. № 1337-Ук 92.
37. Кириллов В.Х., Виттик В.Ф., Виттик А.В. Теплообмен при пленочном течении жидкости в контакте со спутным газовым потоком. - Киев, 1992. - 9 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 31.08.92. № 1337-Ук 92.
38. Кириллов В.Х., Виттик В.Ф., Виттик А.В. Сопряженный теплообмен в условиях прямотока двух фаз // Тез. докл. Республиканской научно-методической конференции, посвященной 200-летию со дня рождения Н.И. Лобачевского. - Одесса, 1992. - С. 47.
39. Кириллов В.Х., Виттик А.В. Испарительное охлаждение пленки жидкости при перекрестном токе фаз и теплообмен при косвенном испарительном охлаждении сред. - Киев, 1993. - 7 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 25.03.93. № 661-Ук 93.
40. Кириллов В.Х., Виттик А.В. Теплообмен испарительного охлаждения жидкости в плоскопараллельной насадке. - Киев, 1993. - 9 с. - Деп. в ГНТБ Украины 26.07.93. № 1607-Ук 93.
41. Кириллов В.Х., Виттик А.В. Математическое моделирование процессов теплообмена в пленочных аппаратах косвенного испарительного охлаждения. - Киев, 1993. - 13 с. - Деп. в ГНТБ Украины 18.08.93. № 1769-Ук 93.

42. Кириллов В.Х., Витюк А.В. Моделирование процессов тепломассообмена в плоскопараллельной насадке вентиляционной градирни. - Киев, 1993. - 13 с. - Деп. в ГНТБ Украины 11.08.93, №1700-Ук93.

Умовні позначення

$\bar{a}$ - середнє значення змінної a ; x - вісь координат, направлена вертикально вниз, м; y - горизонтальна вісь координат, м; z - вісь координат, м; H, l - висота і довжина насадки, м; $b = 2r$ - відстань між листами, мм; d - діаметр, мм; δ, h_0 - середня товщина плівки, мм; p, e - період та висота виступів РШ, мм; P, E - період та висота гофрування, мм; u, v, w - складові швидкості, м/с; u_0, v_0 - середні по витраті швидкості рідини та газу, м/с; c - фазова швидкість, м/с; t, θ - температура рідини та газу, $^{\circ}\text{C}$; p - парціальний тиск пари; r_D - теплота паротворення, Дж/кг; c_p - питома теплоємність, Дж/(кг $^{\circ}\text{град}$); λ - довжина хвилі, м; τ - час, с; σ - дотичне напруження, Н/м²; θ - температура охолодження, $^{\circ}\text{C}$; ρ - густина, кг/м³; μ - динамічна в'язкість, Н с/м²; ν - кінематична в'язкість, м²/с; σ - поверхневий натяг, Н/м; α - амплітуда хвилі, мм; коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² $^{\circ}\text{град}$); β_p - коефіцієнт масовіддачі, с/м; Re, Nu, Sh, We, Fr - числа Рейнольдса, Нусельта, Шервуда, Вебера, Фруда.

Індекси та скорочення

1, г - рідини; 2, г - газ; в - допоміжний потік; о - основний потік; п - пара; w - стінка; т - турбулентний; ек - еквівалентний; еф - ефективний; 1 - на поверхні розділу рідини - газ; * - критичне, граничне значення; ТМО - тепломасообмін; ТМА - тепломасообмінний апарат; РШ - регулярна шорсткість; ЕН - елемент насадки; РЕА - радіоелектронна апаратура; КН - кондиціонер повітря.

Підписано до друку 16.03.1994 р.

Обсяг 2 друк. арк.

Формат 60х84.

Зам. № 47. Тираж 100.

Друкарня Української державної академії зв'язку ім. О.С. Попова.
Одеса, Старопортофранківська, 61.