Міністерство освіти і науки України
Національний університет харчових технологій

НАУКОВІ ПРАЦІ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

№ 32

Київ НУХТ 2010

УДК 536.242

В.Ф. Мокляк, канд. техн. наук
А.П. Салюк

ТЕПЛООБМІН ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ В ЗАМКНЕНИХ ДВОФАЗОВИХ ТЕРМОСИФОНАХ

Були проведені дослідження теплообміну при конденсації в замкнених двофазових термосифонах. Аналіз отриманих результатів показав визначальні характеристики, які впливають на паровміст динамічного двофазового шару.

Ключові слова: *замкнений двофазовий термосифон, конденсація пари, динамічний двофазовий шар.*

There were the conducted researches of heat exchange during condensation in reserved two-phase thermoyifons. The analysis of the got results showed determining descriptions which influence on vapor content of dynamic diphasic layer.

Key words: *reserved two-phase thermosyfon, condensation of vapor, dynamic diphasic layer.*

До характерних особливостей конденсації пари в умовах замкненої порожнини термосифона необхідно віднести: вплив на закономірності теплообміну залишкових газів та тих, що виділяються в результаті взаємодії теплоносія з внутрішньою поверхнею й не конденсуються; можлива взаємодія фаз на межі розподілу в умовах протиплину плівки рідини та пари; зміна фізичного рівня двофазової суміші й можливе затоплення нею поверхні конденсації; взаємний вплив гідродинамічних явищ на ділянках пароутворення і конденсації, який супроводжується краплевим виносом рідини на конденсаційну поверхню. Аналіз цих особливостей дозволяє стверджувати,що відтворювані результати з інтенсивності теплообміну при конденсації в термосифонах можуть бути отримані лише за умов контрольованих характерних режимів роботи конденсатора, які можуть бути виокремлені на основі попереднього вивчення гідродинамічних характеристик двофазової системи термосифонів.

Дослідженням теплообміну при конденсації пари різноманітних теплоносіїв в умовах замкнених термосифонів присвячена значна кількість робіт. Аналіз цих робіт свідчить про те, що, не дивлячись на єдність думок щодо складнощі явища, яке розглядається, проведені дослідження у більшості випадків виконані без врахування зміни гідродинамічних харак-

© В.Ф.Мокляк, А.П.Салюк, 2010

теристик двофазової системи та режимів руху фаз у замкненій порожнині термосифона.

Разом з тим відомо, що при конденсації рухомої пари, внаслідок можливого існування різних режимів течії фаз, залежності для інтенсивності теплообміну можуть бути отримані на основі виокремлення названих характерних гідродинамічних режимів та врахування специфічних особливостей термосифонів. В іншому випадку одержані результати експериментальних досліджень середньої тепловіддачі можуть бути використані для розрахунків лише тотожних процесів. Названі обставини пояснюють неузгодженість і відоме протиріччя результатів окремих праць з дослідження теплообміну при конденсації в замкнених двофазових термосифонах (ЗДТ).

Як основні (граничні) режими роботи конденсаційної зони термосифонів можуть бути виділені:

1) плівкова конденсація чистої пари проміжного теплоносія за умов проти плину стікаючої плівки рідини й висхідного потоку пари;

2) конденсація пари з динамічного двофазового шару (ДДШ) теплоносія за умов повного затоплення поверхні конденсації двофазовою сумішшю.

Для виокремлення вказаних режимів теплообміну проведені детальні дослідження закономірностей зміни фізичного рівня двофазової суміші в ЗДТ яка характеризує границю між областями невідокремленої (паро рідинна суміш) і відокремленої (плівка рідини-парове ядро) течії фаз теплоносія. Аналіз літературних даних показав,що це питання стосовно умов ЗДТ зовсім не вивчене,а використання відомих результатів для барботажних пристроїв не є можливим у зв'язку зі специфікою процесів гідродинаміки двофазового шару термосифонів (бокове вдування парової фази,малі розміри поперечного перетину шару порівняно з його висотою й т.п.).

Досліди виконувались на установці, а візуальні та гідродинамічні — на скляних моделях,за перетином рівними робочим ділянкам. Висота динамічного двофазового шару визначалася за допомогою скляних вставок в адіабатній зоні термосифонів .В якості безрозмірних кількісних характеристик знаходилися середні об'ємні паровмісти ДДШ,а також дискретно-локальні паровмісти окремих ділянок по всій висоті двофазової суміші п'єзометричним методом за формулами:

$$\bar{\varphi} = 1 - \frac{H_{ваг}}{H_{фіз}}, \qquad (1)$$

$$\varphi_i = \frac{\Delta h_i}{h_i}, \qquad (2)$$

де $H_{ваг}$, $H_{фіз}$ — відповідно ваговий і фізичний рівні ДДШ, h_i — висота локальної ділянки, Δh_i — перепад п'єзометричних рівнів.

Експерименти виконані в діапазоні зміни параметрів від початку роботи термосифонів до кризи теплопереносу в них.

Візуальні спостереження показали, структура ДДШ термосифонів являє собою дуже турбулізовану парорідинну суміш з крапленим виносом на різну висоту. Висота останньої залежить від теплового навантаження й амплітуди коливання шару, яка визначається видом рідини, тиском і діаметром термосифона. Встановлені два основних режими руху парової фази: снарядний та емульсійний. Снарядний спостерігається в термосифонах малих діаметрів за відносно низьких тисків, нестійкий і супроводжується значними пульсаціями. Зі збільшенням діаметра ЗДТ і тиску в його порожнині рух парової фази стабілізується й переходить в емульсійний з відносно рівномірним розподілом парових пухирців.

Аналіз отриманих результатів показав,що визначальними величинами, які впливають на паровміст ДДШ є: приведена швидкість парової фази, діаметр термосифона, рід і тиск проміжкового теплоносія. Це дозволило отримати систему узагальнених змінних для опису закономірностей зміни досліджуваної гідродинамічної характеристики $\bar{\varphi}$:

$$\varphi_i = f(Fr, Bo, Ar, Kp), \qquad (3)$$

Згідно з візуальними спостереженнями й опрацювання дослідних даних щодо $\bar{\varphi}$ у залежності від числа Bo, було встановлено,що область зміни чисел $Bo \le 18$ відповідає снарядному режиму руху пари, діапазон чисел $Bo \ge 18$ — емульсійному. Діапазон чисел $18 \le Bo \ge 30$ можна практикувати як перехідний режим руху парової фази.

Для отримання узагальнених розрахункових співвідношень використана кінематична модель барботажного шару Д.А. Лабунцова та ін. У відповідності до цієї моделі величина φ на стабілізаційній ділянці кривої розподілу паровмісту по висоті шару може бути визначена як

$$\varphi = \frac{1}{1 + W^* / W_0^{"}}, \qquad (4)$$

де $W^* = W^0 \cdot \psi$ — групова швидкість спливання парових пухирців; W^0 — швидкість спливання одного пухиря. Використовуючи як масштаб для величини W^0 критичну швидкість руху крупних часток рідини й пари у неперервних рідких і газових фазах, що задовольняють рівняння

$$K^0 = c \cdot K_p^n, \qquad (5)$$

де $c = 8{,}2$; $n = -0{,}17$ за $K_p \le 4 \cdot 10^4$; $c = 1{,}35$; $n = 0$ за $K_p \ge 4 \cdot 10^4$, рівняння (4) узгоджене з експериментальними даними дослідження $\bar{\varphi}$ ДДШ термосифонів. При цьому отримані наступні співвідношення для визначення фактора взаємодій пухирців:

$$\psi = 110 \cdot Ar^{-0{,}25}, \qquad (6)$$

для снарядного режиму і $\psi = 3{,}78$ — для емульсійного режиму руху парової фази. Результати узагальнення представлені на рис.1.

Рівняння (4) - (6) спільно з співвідношенням (2) дозволяють розрахувати істинний рівень двофазової суміші за заданого $H_{ваг}$ або необхідний степінь

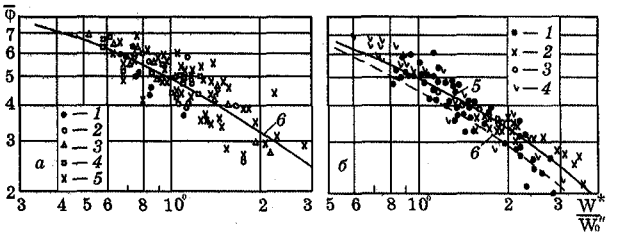

Рис.1 Узагальнення дослідних даних щодо середнього паровмісту ДДШ для снарядного (а) і емульсійного (б) режимів руху пари: а) 1 — фреон-11, $d_{вн}$= 14 мм; 2 — етанол, $d_{вн}$= 14 мм; 3 — вода, $d_{вн}$= 36 мм; 4 — вода, $d_{вн}$= 20 мм; 5 — фреон-11; $d_{вн}$= 20 мм; б) 1 — фреон-11, $d_{вн}$= 36 мм; 2 — фреон-11, $d_{вн}$= 66 мм; 3 — вода, $d_{вн}$= 66 мм; 4 — етанол, $d_{вн}$=36 мм; 5 — за рівнянням (4); 6 — за даними для барботажних пристроїв, вода.

заповнення термосифона , виходячи з оптимальних значень фізичного рівня стосовно конкретних умов.

Для визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі конденсаційна зона виконувалася у вигляді чотирисекційного рекуперативного теплообмінника по типу «труба в трубі», зістикованого з адіабатичною ділянкою. Температура стінки кожної з секцій теплообмінника вимірювалася за допомогою мідного термометра опору. Режим конденсації чистої пари забезпечувався за рахунок підбору необхідної довжини адіабатичної зони й степеня заповнення термосифона теплоносієм, які гарантували умови незатоплення поверхні конденсатора двофазовою сумішшю та видалення газів, що не конденсуються крізь дренажний вентиль у верхній частині термосифона.

Представлення отриманих дослідних даних у координатах

$$Nu^* = f(Re_k), \qquad (7)$$

показує , що при використанні різних теплоносіїв у термосифонах наявні різноманітні режими плівки конденсату: від чисто ламінарного до змішаного. Разом з тим встановлено, що середні значення коефіцієнтів тепловіддачі відхиляються від залежності для ламінарно- хвильового руху за значень чисел Re_k, значно менших найчастіше рекомендованого значення $Re_k = 400$ для конденсації на вертикальній поверхні нерухомої пари. Для з'ясування впливу на інтенсивність теплообміну зустрічного потоку пари ($W_0'' = \frac{4 \cdot q_в \cdot l_k}{r \cdot \rho'' \cdot d_{вн}}$) досліджені дискретно-локальні коефіцієнти тепловіддачі на різних ділянках по висоті конденсатора.

Коефіцієнти тепловіддачі по висоті ділянки конденсації характеризуються суттєвою нерівномірністю, що пов'язано зі зміною умов взаємодії зустрічних потоків рідини та пари. Але очевидна інтенсифікація теплообміну на вході в конденсатор компенсується зниженням значень á у його верхній частині внаслідок виносу рідини й потовщання плівки конденсату. Співставлення одержаних даних середньої тепловіддачі з відомими залежностями для конденсації нерухомої пари (рис.2):

$$\overline{Nu}^* = 1{,}18 \cdot Re_k^{-1/3}, \qquad (8)$$

$$\overline{Nu}^* = \frac{0{,}054 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re_k}{Re_k^{5/6} - 47 + 21 \cdot Pr^{0,4}}, \qquad (9)$$

у координатах $\overline{Nu}^*_{досл} / Nu^* = f(Fr)$ свідчить про досить задовільну узгодженість дослідних даних з розрахованими за (8) і (9) при $Re_k > 100$ впритул до кризи

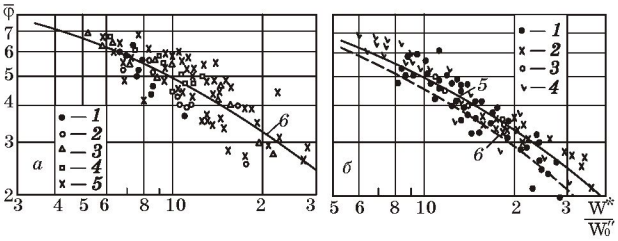

Рис. 2 Узагальнення дослідних даних щодо конденсації чистих парів в термосифонах: 1—5 — фреон-11, $d_{вн}$= 18 мм (1 — P = 0,1 МПа; 2 — 0,3; 3 — 0,4; 4 — 0,5); 6—8 — фреон-113, $d_{вн}$= 18 мм (6 — P = 0,15 МПа; 7 — 0,4; 8 — 0,7); 9, 10 — фреон-11, $d_{вн}$= 36 мм (9 — P= 0,25 МПа; 12 — 0,5); 13 — вода, $d_{вн}$= 66 мм; P = 0,15 МПа.

теплопереносу, яка визначається верхньою межею режиму захлинання двофазової течії в умовах ЗДТ.

Результати дослідження інтенсивності теплообміну для умов затоплення конденсаційної ділянки термосифонів двофазовою сумішшю представлені на рис.3.

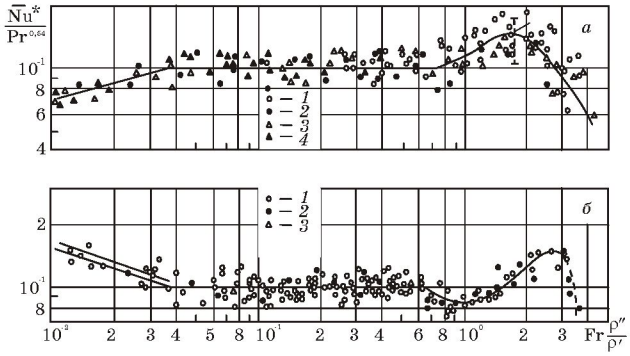

Рис. 3 Узагальнення дослідних даних щодо конденсації пари з динамічного двофазового шару для снарядного (а) і емульсійного (б) режимів течії парової фази: а) 1, 2, 3 — $d_{вн}$= 18 мм; 4 — 36; 1 — 36; 1 — фреон-11; 2 — етанол; 3, 4 — вода; б) 1,2 — $d_{вн}$= 36 мм; 3 — 66; 1 — етанол; 2 — фреон-11; 3 — вода; 4 — за формулою Нусельта для нерухомої пари.

Дослідні дані отримані на термосифонах за відсутності транспортної зони та степенях заповнення рідиною зони пароутворення $\mathring{a}_н = 60...100\%$.

З рисунка видно,що в цілому конденсація в умовах динамічного двофазового шару приводить до підвищення інтенсивності теплообміну порівняно з рішенням Нусельта для плівкової конденсації нерухомої пари. Інтенсифікація теплообміну обумовлена гідродинамічними особливостями процесу конденсації в ДДШ. Поперечне вдування газової суміші, її закрутка, високі приведені швидкості парового потоку й розвинута між фазова поверхня шару обумовлюють високу інтенсивність конденсації.

Аналіз результатів дослідів показав, що закономірності теплообміну при конденсації залежить від режиму руху парової фази. У зв'язку з цим узагальнення дослідних даних виконано для снарядного й емульсійного режимів у відповідності з встановленими границями (Bo < 18 — снарядний режим, Bo > 30 — емульсійний режим) і представлене на рис. 3 залежністю

$$\overline{Nu}^* / Pr^{0,54} = f(Fr^*), \qquad (10)$$

Як видно з представлених узагальнень, при $Fr^* < 4 \cdot 10^{-2}$ закономірності теплообміну в окремих режимах течії пари мають різний характер, що обумовлене різними гідродинамічними обставинами у зоні охолодження за снарядного та емульсійного режимів. У першому випадку зона конденсації заповнена практично повністю почерговими паровими або рідинними снарядами, у другому — конденсатор заповнений двофазовою сумішшю лише частково (пухирцевий режим барботажа). Внаслідок вказаних особливостей коефіцієнти тепловіддачі в пухирцевому режимі у наведеному інтервалі зміни параметра Fr^* практично підкоряються залежності за рівнянням Нусельта. У снарядному режимі спостерігається суттєве зниження інтенсивності теплообміну й середні значення коефіцієнтів тепловіддачі відповідають рівнянню

$$\overline{Nu}^* = 0{,}21 \cdot Pr^{0,54} \cdot Fr^{0,24}, \qquad (11)$$

У діапазоні $Fr^* = 4 \cdot 10^{-2} ... 6 \cdot 10^{-1}$ закономірності теплообміну при конденсації як у снарядному, так і барботажному режимах мають близький характер і можуть розраховуватися за співвідношенням

$$\overline{Nu}^* = 0{,}1 \cdot Pr^{0{,}54}. \qquad (12)$$

Деяка інтенсифікація теплообміну, що спостерігається при $Fr^* > 0{,}6$, пов'язана з активною взаємодією висхідного (у ядрі потоку) й нисхідного (біля стінки) потоків теплоносія. Співставлення отриманих результатів з даними гідродинамічних досліджень протитечійного руху фаз в умовах ЗДТ показує,що початок підвищення інтенсивності теплообміну відповідає початку режиму заклинання, який характеризується початком різкого збільшення коефіцієнтів гідравлічного опору паровому потоку. Лінії 1 і 2 на рис.3 відповідають кризі течії двофазового потоку в термосифонах, пов'язаному з максимумом гідравлічного опору для відповідних режимів. Подальше збільшення приведеної швидкості пари сприяє накопиченню рідкої фази в конденсаційній ділянці, що зумовлює різке зниження інтенсивності теплообміну (як і у випадку конденсації чистої пари) та неможливості нормальної роботи термосифона.

Висновок. Закономірності теплообміну при конденсації в термосифонах залежить від режиму руху парової фази.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О.* «Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах» // «Факт», Киев, 2003.

Надійшла до редколегії 15.03.09