

Дослідження середнього об'ємного паровмісту динамічного двофазного шару в замкнутих термосифонах

В.Ф. Мокляк, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

С.М. Василенко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

А.В. Форсюк, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

Розглянуті умови використання термосифонів у якості теплопередавальних елементів у пристроях з незалежним підведенням теплового потоку. Наведені закономірності процесів гідродинаміки в динамічному двофазному шарі термосифонів під час використання в якості робочих середовищ різних проміжних теплоносіїв.

Ключові слова: замкнений термосифон, динамічний двофазний шар, об'ємний паровміст, режим руху, барботаж, критерій, істинний рівень, ваговий рівень, число Бонда, проміжний теплоносій.

Рассмотрены условия применения термосифонов в качестве теплопередающих элементов в устройствах с независимым подводом теплового потока. Представлены закономерности процессов гидродинамики в динамическом двухфазном слое в термосифонах при использовании в качестве рабочих сред различных промежуточных теплоносителей.

Ключевые слова: замкнутый термосифон, динамический двухфазный слой, объемное паросодержание, режим движения, барботаж, критерий, истинный уровень, весовой уровень, число Бонда, промежуточный теплоноситель.

Унікальні властивості замкнених двофазних термосифонів (ЗДТ), головними серед яких є автономність, двоконтурність, можливість локалізації точки роси на обмеженій поверхні, здатність задовольнити практично весь набір специфічних вимог вогнетехніки, конструктивна та оптимізаційна гнучкість і низка інших переваг, не знайшли широкого застосування в Україні. Це частково пояснюється відсутністю техніко-економічного аналізу результатів впровадження та недостатнім висвітленням результатів досліджень та розробок в наукових виданнях країни.

У роботі представлені результати дослідження середнього об'ємного паровмісту динамічного двофазного шару, необхідних для обґрунтованого проектно-конструкторського розрахунку ЗДТ.

Як показано в ряді робіт, застосування термосифонів у якості теплопередавальних елементів у пристроях з незалежним підведенням теплового потоку (наприклад, у різних вогнетехнічних агрегатах, енергетичних установках цукрової галузі та ін.) можливе при повному затопленні двофазовою сумішшю проміжного теплоносія ділянки підведення теплоти. У зв'язку з цим важливим розрахунковим параметром є істинний рівень динамічного двофазного шару (суміші рідини та пухирців пари). Знання закономірностей його зміни дозволяє виробляти обґрунтований вибір степені заповнення, що забезпечує раціональні умови роботи теплообмінних зон термосифона.

Для розрахунку істинного рівня двофазової суміші необхідні закономірності зміни основної характеристики динамічного двофазного шару – істинного по висоті шару об'ємного паровмісту суміші. Найвні дослідження зміни цього параметра [1-3] в барботажних апаратах для систем водяна пара-вода, повітря-вода. Проте використання цих результатів для розрахунку істинного рівня двофазної суміші в термосифонах ускладнене. Прямі дослідження стосовно термосифонів у літературі практично відсутні.

Особливості процесів гідродинаміки в динамічному двофазному шарі у термосифонів порівняно з процесами в звичайних барботажних апаратах – боковий вдів газової фази та невеликі розміри поперечного перерізу шару відносно його висоти. Становить інтерес вивчення закономірностей цих процесів при використанні в якості робочих середовищ різних проміжних теплоносіїв. Для цього були проведені спеціальні дослідження середнього об'ємного паровмісту динамічного двофазного шару замкнутих термосифонів, які проводились на установці [4, 5], яка включає в себе вертикально встановлені термосифони зі скляними адіабатичними ділянками, засоби електронагріву та охолодження, систему вакуумування та заповнення термосифонів проміжним теплоносієм, а також контрольно-вимірвальну апаратуру.

Висота динамічного двофазного шару визнача-

лась візуально за верхнім значенням амплітуди коливання шару. Дослідження проводились на термосифонах з внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 14, 20, 36, 66$ мм. В якості проміжних теплоносіїв використовувались вода, етанол, метанол та R11. Діапазон зміни параметрів: тиску $p = 0,10 \dots 1,0$ МПа; приведеної швидкості пари $W''_0 = 0,13 \div 2,5$ м/с; степені заповнення зони нагрівання $\varepsilon_{3,н} = 50 \div 100\%$, довжини зони нагрівання $l_{3,н} = 0,3 \div 1,2$ м.

Вивчалась залежність середнього об'ємного паровмісту (основної характеристики динамічного двофазного шару) від геометричних, режимних та фізичних параметрів. Середній об'ємний паровміст визначався як

$$\varphi_{\text{ср}} = 1 - \frac{H_{\text{ваг}}}{H}, \quad (1)$$

де $H_{\text{ваг}}$ – ваговий рівень шару, м; H – висота динамічного двофазного шару, м.

Візуальні спостереження показали, що структура динамічного двофазного шару в досліджених термосифонах являє собою сильно турбулізовану парорідинну суміш з краплевим виносом на різну висоту. Величина останньої залежить від теплового навантаження та амплітуди коливання шару, що обумовлюється родом рідини, тиском та діаметром термосифона. Встановлено два основних режими руху парової фази: снарядний і барботажний. Снарядний спостерігається в термосифонах малого діаметру при відносно низькому тиску та нестійкий (супроводжується значними пульсаціями). Зі збільшенням діаметра термосифона та тиску в його порожнині процес руху парової фази стабілізується та переходить в барботажний режим з відносно рівномірним розподілом парових бульбашок по перерізу термосифона.

На **рис. 1** представлено опрацювання дослідних даних у вигляді залежності об'ємного паровмісту від приведеної швидкості парового потоку W''_0 для термосифона з внутрішнім діаметром 36 мм та етанолом в якості проміжного теплоносія. З рисунка видно, що $\varphi_{\text{ср}}$ зростає зі збільшенням приведеної швидкості парової фази та тиску у всьому досліджуваному діапазоні інших параметрів. Причина цього – зниження швидкості підйому парових бульбашок в рідині зі зростанням тиску та підвищення рівномірності розподілу фаз по перерізу термосифона при збільшенні приведених швидкостей парового потоку.

Дослідами встановлено, що зміна довжини зони нагрівання термосифона та ступені заповнення її проміжним теплоносієм практично не впливає на величину середнього об'ємного паровмісту динамічного двофазного шару $\varphi_{\text{ср}}$.

Розгляд умов перебігу процесів гідродинаміки у двофазному шарі термосифона дозволяє отримати наступну систему узагальнених змінних для описання закономірностей зміни шуканої гідродинамічної характеристики:

$$\varphi_{\text{ср}} = f\left(\text{Fr}, \text{Ar}, \text{Bo}, \text{K}_p, \frac{l_{3,н}}{d}, \varepsilon_{3,н}\right), \quad (2)$$

де $\text{Fr} = \frac{W''_0}{\sqrt{g\delta}}$ – число Фруда; $\text{Ar} = \frac{g\delta^3}{\nu'^2} \frac{\rho' - \rho''}{\rho'}$ – число Архімеда; $\text{Bo} = \frac{d}{\delta}$ – число Бонда; $\text{K}_p = \frac{\rho\delta}{\sigma}$ – критерій тиску; $\sigma = \sqrt{\sigma/g(\rho' - \rho'')}$ – стала Лапласа; d – діаметр термосифона, м; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ', ρ'' – відповідно гус-

тина рідкої та парової фази проміжного теплоносія, кг/м³; p – тиск у термосифоні, Па; δ – товщина шару, м; ν' – питомий об'єм рідкої фази проміжного теплоносія, кг/м³, σ – поверхневий натяг, Н/м.

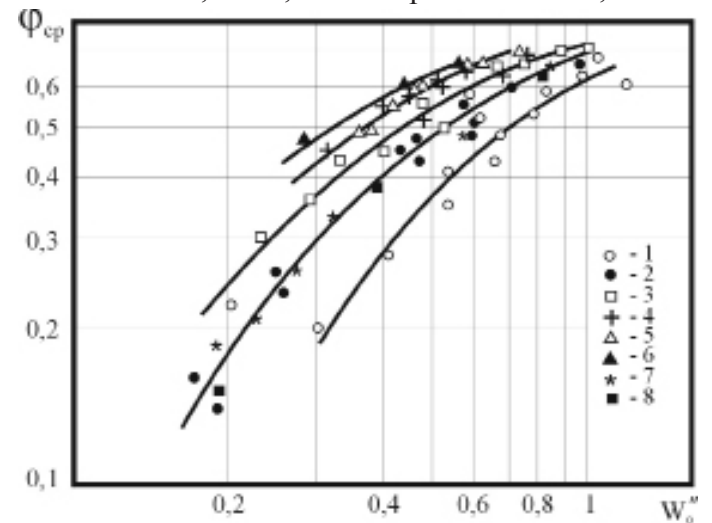


Рис. 1. Залежність середнього об'ємного паровмісту суміші від приведеної швидкості парової фази ($d_{\text{вн}} = 36$ мм, теплоносієм – етанол): 1 – $p = 1,0$ бар; 2 – $p = 2,0$ бар ($t_{3,н} = 0,64$; $\varepsilon_{3,н} = 90\%$); 3 – $p = 3,0$ бар; 4 – $p = 4,0$ бар; 5 – $p = 5,0$ бар; 6 – $p = 6,0$ бар; 7 – $p = 7,0$ бар ($t_{3,н} = 0,5$, $\varepsilon_{3,н} = 100\%$); 8 – $p = 2,0$ бар ($t_{3,н} = 0,91$; $\varepsilon_{3,н} = 50\%$)

У досліджуваному діапазоні зміни визначальних параметрів залежності від $l_{3,н}$ та $\varepsilon_{3,н}$ не виявлені, тому система (2) набуває вигляду

$$\varphi_{\text{ср}} = f(\text{Fr}, \text{Ar}, \text{Bo}, \text{K}_p). \quad (3)$$

Залежність (3) використана для узагальнення дослідних даних. При цьому насамперед були встановлені границі існування двох характерних (спостережуваних візуально) режимів руху парової фази в межах динамічного двофазного шару термосифона. Припускаючи ступінь впливу числа K_p , що характеризує стисливість двофазного середовища, однаковою для різних режимів руху парової фази, на **рис. 2** подані дослідні дані у вигляді залежності $\varphi_{\text{ср}}$ від числа Bo для рідин з приблизно однаковим значенням числа Ar .

Як видно з рисунка, існують три області зміни числа Bo , що відповідають різному характеру зміни середнього об'ємного паровмісту шару: діапазон чисел $\text{Bo} \leq 18$ – снарядний, область $\text{Bo} \geq 30$ – барботажний, в інтервалі $18 \leq \text{Bo} \leq 30$ – перехідний режим руху парової фази.

Наявність зазначених режимів може бути пояснена тим, що в області малих чисел Bo відбувається

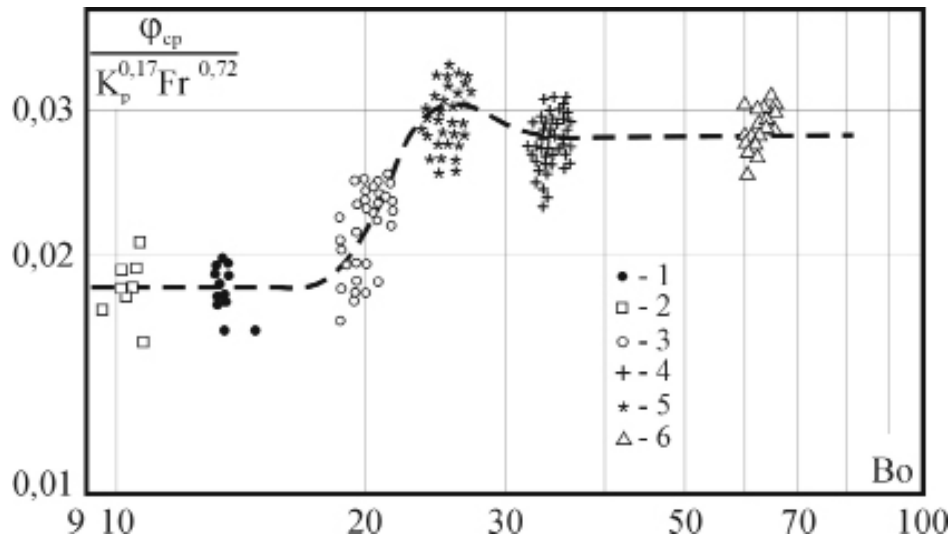


Рис. 2. Вплив числа Bo на режим роботи термосифона: 1,3,4,6 – R11; 1 – $d_{вн} = 14$ мм; 3 – 20 мм; 4 – 36 мм; 6 – 66 мм; 2,5 – етанол; 2 – $d_{вн} = 14$ мм; 5 – 36 мм

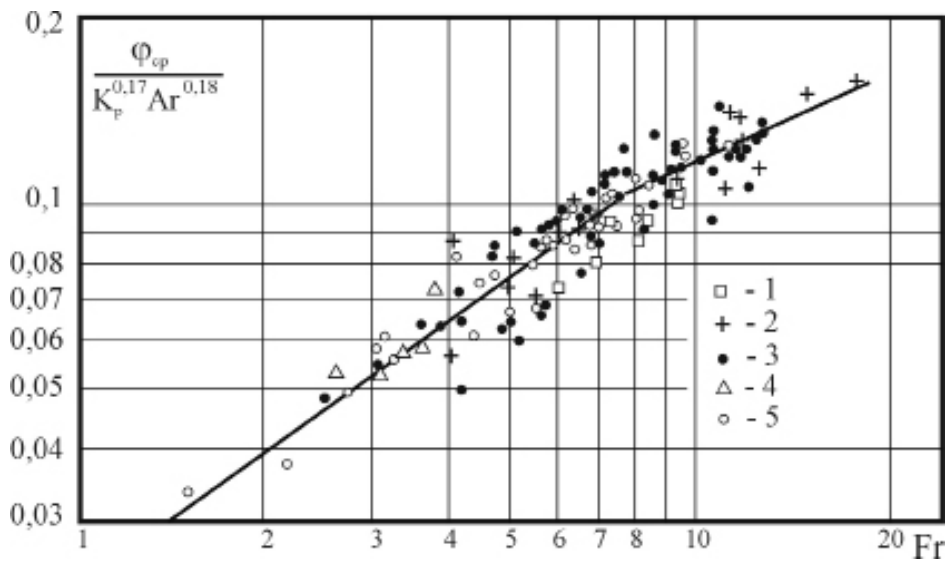


Рис. 3. Узагальнення дослідних даних для снарядного режиму: 1 – $d_{вн} = 14$ мм, етанол; 2, 3 – $d_{вн} = 20$ мм; 2 – метанол; 3 – R11; 4 – $d_{вн} = 20$ мм, вода; 5 – $d_{вн} = 36$ мм, вода

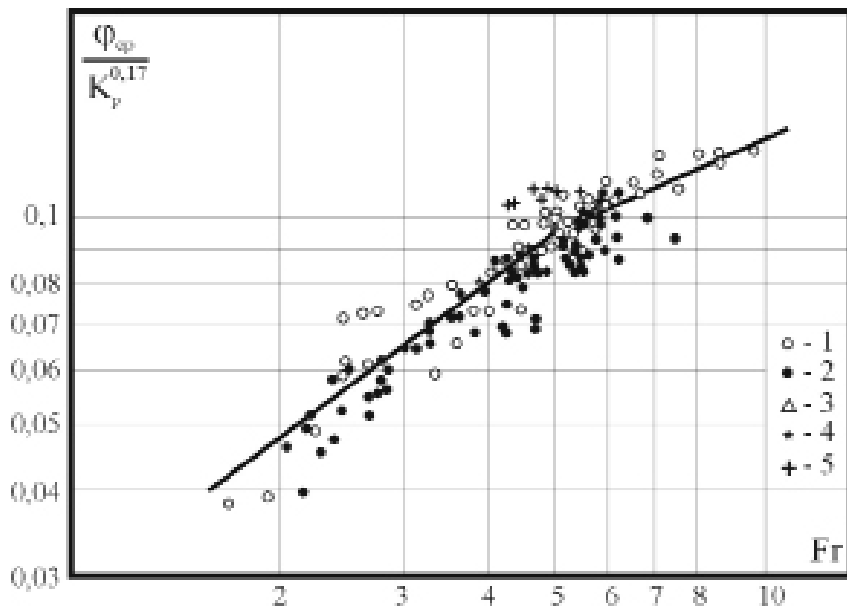


Рис. 4. Узагальнення дослідних даних для барботажного режиму: 1, 2 – $d_{вн} = 36$ мм; 1 – етанол; 2 – R11; 3, 4, 5 – $d_{вн} = 66$ мм; 3 – R11; 4 – вода; 5 – етанол

ся утворення парових пробок, за розмірами співставними з діаметром термосифона, в результаті зменшується міжфазне тертя на границі пар – рідина та зростає швидкість підйому парової фази. Зі збільшенням діаметра термосифонів (числа Bo) відбувається подрібнення парової фази, що призводить до зростання міжфазного тертя та зниження швидкості підйому парових пухирів, в результаті чого середній об'ємний паровміст динамічного двофазного шару помітно зростає.

Узагальнення дослідних даних для двох основних режимів руху парової фази теплоносія (снарядного та барботажного) приведено на **рис. 3** і **рис. 4**.

Отримані узагальнені залежності, що дозволяють розрахувати значення φ_{cp} для снарядного режиму

$$\varphi_{cp} = cFr^n Ar^{0,18} K_p^{0,17}, \quad (4)$$

де $c = 2,4 \cdot 10^{-3}$, $n = 0,72$ при $Fr \leq 7,5$; $c = 1,03 \cdot 10^{-2}$, $n = 0,47$ при $Fr > 7,5$.

для барботажного режиму

$$\varphi_{cp} = cFr^n K_p^{0,17}, \quad (5)$$

де $c = 2,8 \cdot 10^{-3}$, $n = 0,72$ при $Fr \leq 7,5$; $c = 9,5 \cdot 10^{-3}$, $n = 0,47$ при $Fr > 7,5$.

З **рис. 4** видно, що для сильно турбулізованої двофазної суміші, характерної для барботажного режиму, в'язкість рідини не впливає на її гідродинамічні характеристики.

Рівняння (4) і (5) спільно зі співвідношенням (1) дозволяють розраховувати істинний рівень двофазної суміші в термосифоні, або при заданому значенні істинного рівня – необхідний для цьо-

го вагомий рівень, що забезпечує надійну та ефективну роботу термосифона в різних вогнетехнічних пристроях.

Висновки

1. Встановлені три характерних режими (три області зміни числа Bo), що відповідають різному характеру зміни середнього паровмісту.

2. Отримані узагальнені залежності, які дозволяють розрахувати значення середнього паровмісту.

3. Отримані рівняння дозволяють розрахувати істинний рівень паровмісту двофазної суміші й обґрунтовано вибрати як степінь заповнення ЗДТ, так і необхідний ваговий рівень, що конкретизує та розширює рамки проектування теплообмінників на основі термосифонів.

Список використаних джерел

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: Высшая школа, 1977.

2. Бартоломей Г.Г., Алхутов М.С. Определение истинного паросодержания при барботаже на участке стабилизации. – Теплоэнергетика, 1967, №12, С. 80-81.

3. Дементьев Б.А. О влиянии диаметра колонки и давления на паросодержание водяного объема устройств с барботажом пара через воду. – Теплоэнергетика, 1957, №4, С. 45-49.

4. Безродный М.К., Алексеенко Д.В. Исследование кризиса тепломассопереноса при кипении ф-11 в испарительных термосифонах. – Вопросы радиоэлектроники, серия ТРТО, 1976. Вып.1, С. 110 – 116.

5. Алабовский А.Н., Безродный М.К., Мокляк В.Ф. Исследование теплообмена при конденсации паров в вертикальных термосифонах. – Изв. Вуз. СССР – Энергетика, 1979, №7, С. 61-67.

ЦІКАВІ НОВИНИ

Американські вчені створили корисне паливо

На сьогоднішній день в світі актуальна тенденція створення корисних видів палива, щоб зберегти нашу планету. Так і новий проект по створенню біопалива повинен уповільнити глобальне потепління.

Найбільші компанії світу вкладають кошти в інноваційний проект по створенню біопалива, яке уповільнить глобальне потепління. Google Ventures, BP, General Electric і ConocoPhillips інвестують створення заводу, розташованого в Луїзіані. Проектом заправляє стартап, названий Cool Planet, і ця компанія займається тим, що створює рідке паливо з органіки рослинного походження.

Основою сировини є сільськогосподарські відходи, такі як кукурудзяні стебла і цукрова тростина. При обробці цієї сировини, яка і є паливом, надвисокими температурами і тиском при мінімальній кількості кисню або зовсім без нього виходить особлива субстанція, названа біочар. Ця субстанція має властивість утримувати вуглекислий газ і є, по суті, добрином.

На гроші інвесторів Cool Planet планує створення невеликих станцій виробництва біопалива недалеко від його джерела.

«Якщо немає необхідності транспортувати біомасу до місця виробництва, це зменшить не тільки собівартість, але і забруднення атмосфери», - говорить виконавчий директор Cool Planet Ховард Янцен.

Джерело: Телеграф