

Вторгер
3-38

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ЗАХАРЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ФЕДОРОВИЧ

УДК 621.65.83-97:33.072.8

**ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ НА
ОСНОВІ ЗМІЙОВИКОВИХ ВИПАРНИХ ТЕРМОСИФОНІВ**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2006

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор **Смирнов Генріх Федорович**,
Одеська державна академія холоду МОН України

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор **Бурдо Олег Григорович**,
Одеська національна академія харчових технологій МОН України,
завідувач кафедри процеси і апарати харчових технологій

кандидат технічних наук, доцент **Косой Борис Володимирович**,
Одеська державна академія холоду МОН України,
завідувач кафедри програмування

Провідна організація – Одеський національний політехнічний університет

Захист дисертації відбудеться 19 червня 2006 р. об 11 годин в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Дисертацію можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, Одеса, Україна.

2006 року.

Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

XV 1070
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Актуальність теми. Питання економії матеріальних і паливно-енергетичних ресурсів мають суттєве значення для сталого розвитку різних галузей промисловості, енергетики і агропромислового комплексу. Зменшення енергоємності і металоємності у народному господарстві України у багатьому визначається переходом до ресурсозберігаючої техніки різного роду. Зокрема, успішне рішення цієї проблеми можливо при використанні випарних термосифонів (ВТС) і теплових труб (ТТ) як теплопередавальних пристроїв.

Одним з перспективних напрямків є застосування змійовикових ВТС (ЗВТС) як основи різних теплообмінних апаратів (ТА). Ці пристрої характеризуються малими розмірами теплопередавальних елементів (внутрішній діаметр трубок 2-4 мм), що дозволяє суттєво покращити масогабаритні показники, скоротити вартість обладнання і забезпечити ефективне використання таких апаратів в різних, в тому числі і в спеціальних умовах експлуатації.

Особливо перспективним такий напрямок розвитку теплообмінних апаратів на основі ТТ може мати місце у тих випадках, коли поверхня теплообміну підлягає істотному агресивному впливу тріючого або охолоджуваного середовища: повітропідігрівачі, які використовують тепло відхідних газів з високим вмістом окислів сірки, фтору, хлору; теплообмінні апарати, які забезпечують перенесення тепла (холоду) від розсієльних систем і т.д. В цих умовах стає більш переважливим, а в багатьох випадках і необхідним, перехід від металу до полімерних матеріалів (наприклад, фторопласт), для яких використання такого традиційного засобу інтенсифікації процесів теплопередачі як оребрення, стає не виправданим як з технологічної, так і з фізичної точки зору. Разом з тим, немає будь-яких принципових перешкод для створення з цих матеріалів теплообмінних апаратів на основі відповідних ТТ або ВТС, але такий практичний та дослідницький досвід фактично відсутній. Серед вчених, які плідно працювали у цьому напрямку, слід відзначити такі імена як М.К.Безродний, Л.С. Піоро, Г.Ф. Смирнов, Л.Л. Васильєв, М.Г. Семена та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконувалася відповідно до таких законодавчих актів як: Закон України № 74/94-ВР від 01.07.94 р. «Про енергозбереження»; Постанова Кабінету Міністрів України № 583 від 05.02.97 р. «Про комплексну державну програму енергозбереження України»; Постанова Кабінету Міністрів України № 256-р від 31.03.99 р. «Про використання паливно-енергетичних ресурсів та скорочення технологічних втрат теплової енергії»; Закон України № 2509-IV від 05.04.05 р. «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу», та ін.

Мета і задачі досліджень. Мета роботи полягає в експериментальному обґрунтуванні працездатності нового теплообмінного обладнання на основі ЗВТС, у тому числі з фторопласту, для різних галузей техніки і розробці рекомендацій по його подальшому використанню

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА
академія

Об'єктами дослідження є ВТС малого внутрішнього діаметру (2÷4 мм), теплообмінний апарат типу газ-газ і теплопередавальний пристрій для охолодження радіоелектронної апаратури (РЕА) на основі ЗВТС.

Предметами дослідження є теплопередавальні характеристики випарних термосифонів малого внутрішнього діаметру (2÷4 мм), теплообмінного апарата типу газ-газ і теплопередавального пристрою на основі ЗВТС із металу та фторопласту 4 Д, а також конструктивно-технологічні фактори, що впливають на працездатність цих пристроїв.

Для досягнення поставленої мети, були сформульовані такі основні задачі дослідження:

- проаналізувати існуючі конструкції двофазних теплопередавальних пристроїв, а також процеси, які відбуваються при їх роботі, і засоби інтенсифікації таких процесів;
- аналітично обґрунтувати ефективність і доцільність застосування трубок малого діаметру в теплообмінних апаратах типу газ-газ на основі ЗВТС;
- на основі фізичного аналізу провести систематизацію можливих режимів роботи двофазних теплопередавальних пристроїв змійовикового типу;
- провести класифікацію двофазних теплопередавальних пристроїв змійовикового типу відповідно до конструктивних особливостей;
- розробити експериментальні установки і провести комплексні експериментальні дослідження з визначення максимальних теплових потоків при кипінні рідин у термосифонах з внутрішніми діаметрами трубок 2-4 мм, теплопередавальних характеристик теплообмінного апарата типу газ-газ і теплопередавального пристрою на основі ЗВТС, у тому числі із фторопласту;
- узагальнити дані експериментальних досліджень і розробити рекомендації по їх практичному використанню.

Вирішення поставлених задач було досягнуте за допомогою наступних методів дослідження:

- аналітичного дослідження теплотехнічної ефективності теплообмінних апаратів типу газ-газ на основі випарних термосифонів і теоретичного аналізу можливих режимів роботи двофазних теплопередавальних пристроїв змійовикового типу;
- експериментальних досліджень критичних теплових потоків у ВТС малого внутрішнього діаметру (2-4 мм), теплопередавальних характеристик теплообмінного апарата типу газ-газ і теплопередавального пристрою на основі ЗВТС;
- інженерних досліджень, спрямованих на створення методичної основи розрахунку і проектування теплообмінних апаратів на основі ЗВТС.

Одержані результати дозволили сформулювати таке наукове положення:

Для умов теплопереносу от корозійно-агресивних середовищ, використання теплообмінних апаратів типу газ-газ на основі змійовикових випарних термосифонів із трубок діаметром 2÷4 мм, виготовлених із фторопласту, дозволяє підвищити інтенсивність процесу зовнішньої тепловіддачі у 1,5÷3 рази порівняно з традиційними теплообмінними апаратами на основі поодиноких випарних термосифонів.

Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів визначається коректною постановкою завдань досліджень; надійністю методики експериментальних досліджень; оцінкою величини похибки вимірювань; погодженням розрахункових і експериментальних даних, а також якісним погодженням із результатами досліджень інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- обґрунтована доцільність переходу від випарних термосифонів традиційної геометрії до термосифонів на основі змійовикової конструкції. Вперше здійснена класифікація по конструктивних особливостях двофазних теплопередавальних пристроїв змійовикового типу і систематизація можливих режимів роботи таких пристроїв;
- доведено принципову можливість використання існуючих закономірностей для критичних теплових потоків у випарних термосифонах при малих внутрішніх діаметрах шляхом введення поправочних коефіцієнтів, що враховують вплив зменшення внутрішнього діаметру на величини щільностей максимальних теплових потоків;
- запропоновано новий підхід до проблеми конструювання теплообмінних апаратів на основі термосифонів для умов підвищених вимог до поверхні теплообміну з точки зору корозійної стійкості;
- отримано експериментальне підтвердження принципової можливості забезпечення ефективної і сталої роботи теплообмінних апаратів типу газ-газ і теплопередавального пристрою при використанні змійовикових випарних термосифонів із фторопласту і металу.

Практичне значення одержаних результатів:

- визначено умови і рекомендації, що до забезпечення максимальної теплотехнічної ефективності при проектуванні компактних теплообмінних апаратів на основі випарних термосифонів з мінімальними розмірами теплопередавальних елементів, зокрема, для тих областей використання, де необхідний перехід від металевих поверхонь теплообміну до полімерних;
- для випарних термосифонів малого внутрішнього діаметру, теплопередавальних пристроїв і теплообмінних апаратів на основі змійовикових випарних термосифонів експериментальним шляхом визначені конструктивно-технологічні фактори та режимні параметри, що впливають на величини теплових потоків при кипінні рідин.

- уточнені відповідні коефіцієнти в узагальнюючій залежності М.К. Безродного для розрахунку порушення сталості течії двофазного потоку, що викликає кризи теплопереносу у ВТС із організованою і неорганізованою циркуляцією теплоносія;
- отримано емпіричну залежність для визначення щільностей критичних теплових потоків у протитокових ВТС ($1,5 < Bo < 4,5$) при $d_{en}/L_n \leq 0,18$;
- запропоновано методику для розрахунку і проектування ТА на основі ЗВТС.

Особистий внесок здобувача. Наведені в дисертаційній роботі результати досліджень одержані здобувачем в Одеській державній академії холоду. Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні вибору об'єктів досліджень, в створенні експериментальних установок і макетних зразків, у збиранні, обробці і аналізі експериментальної інформації. У співавторстві проведена серія експериментальних досліджень характеристик ТА типу газ-газ на основі полімерного ЗВТС.

Апробація роботи. Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях: II Міжнародна конференція «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, 2001); 12 Міжнародна конференція по теплових трубах (Москва-Кострома-Москва, 2003); а також на наукових семінарах кафедри ТМО ОДАХ 2004 і 2005 рр.

Основний зміст дисертації опубліковано у 4 статтях, надрукованих у наукових журналах, які відповідають вимогам ВАК України, а також у виданні збірника праць конференції.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, списку використаної літератури і додатків. Загальний об'єм роботи – 154 сторінки, включаючи 41 рисунок, 10 таблиць, перелік літературних джерел із 126 найменувань і додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації і показано її зв'язок з існуючими науковими проблемами. Сформульовані мета і задачі досліджень. Розглянута новизна одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, про апробацію роботи і публікації.

Перший розділ дисертації присвячений огляду літератури про існуючі конструкції двофазних теплопередавальних пристроїв і теплообмінних апаратів на їх основі, розглянуто процеси теплопереносу, які відбуваються при їх роботі і засоби інтенсифікації таких процесів.

Існує досить великий спектр технологічних задач, які обумовлюють різні конструктивні рішення теплообмінних апаратів. Аналіз існуючих літературних джерел про тенденції застосування ТА на теплових трубах дозволив зробити висновок, що поряд з іншими типами ТА на основі ТТ своє застосування одержали теплообмінні апарати типу газ-газ. В основному, ці апарати призначені для енергозберігаючих технологій, систем кондиціонування та вентиляції. Основний тип ТТ, які використовуються - випарні термосифони. Найбільш поширеним засобом

інтенсифікації теплообміну є розвиток теплопередавальних поверхонь шляхом застосування оребрення.

Традиційні конструктивні форми теплообмінних апаратів на основі ТТ і ВТС варто віднести до "жорстких" конструкцій, що не піддаються простим змінам у технологічному відношенні. Використання в якості теплопередавальних елементів "гнучких" змійовикових форм відкриває широкі можливості технологічного вдосконалення ТА, розширення областей їх ефективного застосування. У існуючих літературних джерелах не зустрічається обґрунтування переходу від традиційних конструктивних форм ТА до змійовикових, відсутні дані про вплив такої форми теплопередавальної поверхні на працездатність і теплопередавальні характеристики теплообмінних апаратів.

У розділі проведено аналіз існуючої літератури по граничних теплових потоках у ВТС. У роботах М.К. Безродного показано, що криза теплопереносу у ВТС не пов'язана з такими формами, як криза кипіння першого та другого роду, які характерні для кипіння в умовах великого об'єму. Максимальна теплопередавальна здібність ВТС обмежується групою кризових явищ, які описані універсальним критеріальним рівнянням виду:

$$K = C \cdot Ar^m \cdot K_p^n, \quad (1)$$

де коефіцієнти C , n , m вибираються в залежності від типу кризового явища, критерію тиску K_p , чисел Ar , Bo і співвідношення h'/L_n (для ВТС з організованою циркуляцією теплоносія).

Другий розділ дисертації присвячений теоретичному аналізу ефективності теплообмінних апаратів типу газ-газ і аналізу можливих режимів роботи теплопередавальних пристроїв змійовикового типу.

Відомо, що збільшити коефіцієнти теплопередачі можна шляхом зменшення діаметру труб, що при поперечному обтіканні сприятливо впливає на зростання інтенсивності тепловіддачі при не істотному зростанні аеродинамічних опорів, як це має місце при застосуванні оребрення.

Перехід до малих розмірів теплопередавальних елементів, як правило, обіцяє вигреш у масогабаритних і вартісних показниках, однак, при зменшенні діаметрів з одночасною відмовою від зовнішнього оребрення буде зростати в багато раз кількість ВТС, що забезпечують задані параметри теплопереносу. Тому ефективність такого заходу, як зменшення діаметрів ВТС для застосування в ТА типу газ-газ, залежить від можливості одночасного зменшення діаметру ВТС, не збільшувати об'єми собівартості на їх виготовлення, включаючи такі операції як: внутрішнє очищення поверхонь, дегазація, заправлення, герметизація, контроль і ін. Таке технологічне рішення можливо, якщо використовувати такі пристрої як колекторні ВТС або пульсаційні теплові труби, які можна визначити і як "змійовикові" ВТС.

У розділі визначено умови і обмеження по зниженню зовнішнього діаметру ВТС у ТА типу газ-газ з погляду граничного теплопереносу. Показано вплив різниці температур потоків, швидкостей обтікання і відносних довжин ВТС L_n/d на величину $d_{\text{зоє}}^{\text{min}}$.

Виконано порівняльний теплотехнічний аналіз теплообмінних апаратів типу газ-газ на основі поодиноких і колекторних ВТС. Для проведення аналізу були прийняті умови:

- однофазний конвективний теплообмін теплоносіїв з однаковими значеннями коефіцієнтів теплопередачі для конструкцій ТА, що зіставляють;
- однакові водяні еквіваленти, однакові відносні напрямки руху теплоносіїв і умови обтікання поверхонь;
- однакові повні поверхні теплообміну у зонах нагрівання і охолодження.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано перехід від випарних термосифонів традиційної геометрії до термосифонів на основі змійовикової конструкції. Визначено умови і рекомендації для проектування компактних ТА на основі ВТС з мінімальними розмірами теплопередавальних елементів (2-4 мм).

На основі фізичного аналізу наведено перелік можливих режимів роботи у теплопередавальних пристроях змійовикового типу (ЗТП).

Якщо внутрішній діаметр змійовика ЗТП достатньо малий, так що додержується умова:

$$d_{\text{вн}} < 2,2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho^*)}}, \quad (2)$$

і двофазна суміш існує у формі парових і рідинних снарядів, що чергуються, тоді у ЗТП переважним буде “індивідуальний” механізм двофазного теплопереносу, що реалізується у двох, трьох і т.д. сусідніх гілках. Даний механізм описаний у роботах Кузнецова І.О., і його можна позначити як механізм № 1.

У тих випадках, коли частоти і фази пульсації співпадають у всіх чарунках, може проявитися “колективний механізм”. Якщо змійовик ЗТП незамкнутий, то виникнення “колективного” механізму повинно привести до “хвильового” режиму двофазного тепломасопереносу, тобто механізму № 2 - хвильового колективного механізму.

У випадку, коли конструкція ЗТП замкнута, тобто створює контур, то прояв “колективного” механізму повинно привести до виникнення циркуляції двофазної суміші по всьому контуру. Можна вважати цей механізм як механізм № 3 - колективний механізм сталої циркуляції у замкнутому ЗТП.

При додержанні умов:

$$2,2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho^*)}} < d_{\text{вн}} < \frac{4q_{\text{н}}^1 \varphi}{r \rho^* W} \quad (3)$$

можливо існування “снарядної” структури двофазної течії, але в деякому динамічному режимі, коли є зони підводу і відводу тепла, режими, що встановилися і т.д. Для таких умов, в свою чергу можливі різні режими.

Режим № 4 може спостерігатися у тих випадках, коли немає наскрізної циркуляції у межах ЗТП і немає, як такої, її снарядної структури, але можливо періодична поява і зникнення парових снарядів, що приводить до пульсації парорідинних стовпів, але таким чином, що перенос теплоносія з однієї чарунки в іншу неможливий, або короточасний і не супроводжується організацією направленої циркуляції. У режимі № 4 закономірності двофазного тепломасопереносу у ЗТП повинні підлягати тим же закономірностям, що і у системі окремих ВТС.

Режим № 5 – режим, при якому за рахунок перерозподілу об’ємів рідини між гілками створюються такі умови, при яких досягається погодження однакових значень температури насичення теплоносія в умовах “незалежної” роботи кожної гілки.

Режим № 6 – режим несталої, періодичної циркуляції двофазної суміші.

Режим № 7 – режим виникнення сталої направленої циркуляції двофазної суміші.

Запропоновано класифікацію двофазних змійовикових теплопередавальних пристроїв, яку слід проводити відповідно до умов кипіння проміжного теплоносія, що визначається співвідношенням таких величин як характерний розмір каналу і сталої Лапласа. Тобто, пульсаційною тепловою трубою є така конструкція ЗТП, для якої вірна умова (2). При додержанні умов (3), конструкцію змійовикового теплопередавального пристрою слід вважати ЗВТС.

Також у розділі наведено наближену модель двофазного тепломасопереносу у ЗТП. Дана модель може використовуватися для розрахунку рушійного напору і середньої швидкості переміщення снарядів у ЗТП при різних режимних параметрах і розташуваннях у просторі.

У третьому розділі описано експериментальні установки, робочі ділянки і методики проведення експериментальних досліджень.

Дослідження максимальної теплопередавальної здібності “капілярних” термосифонів проводилось на експериментальній установці, схема якої зображена на рис. 1.

Експериментальні ділянки мали три основні зони: зону нагрівання, транспортну зону, зону конденсації і уявляли традиційну конструкцію, тобто герметичну трубку (або трубку у вигляді замкнутого контуру), частково заповнену теплоносієм. Для проведення досліджень було виготовлено декілька термосифонів із нержавіючої сталі і кварцового скла $d_{\text{вн}}=2; 3; 3,5; 4$ мм загальною довжиною 268÷923 мм.

Підведення тепла до випарника ВТС 1 здійснювався за допомогою електронагрівача 2 підключеного в мережу через джерело живлення 3, відведення тепла здійснювалось у конденсаторі 4 типа “труба в трубі”. Електронагрівач намотувався поверх діелектричної плівки товщиною 0,1 мм.

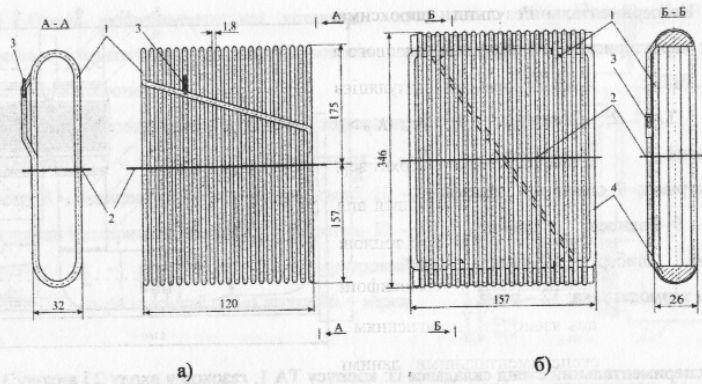


Рис. 3. Експериментальні ЗВТС:

а – металевий ЗВТС; б – полімерний ЗВТС; 1 - трубчастий змійовик; 2 - роз'єднувальна пластина; 3 - заправний патрубок; 4 - каркас

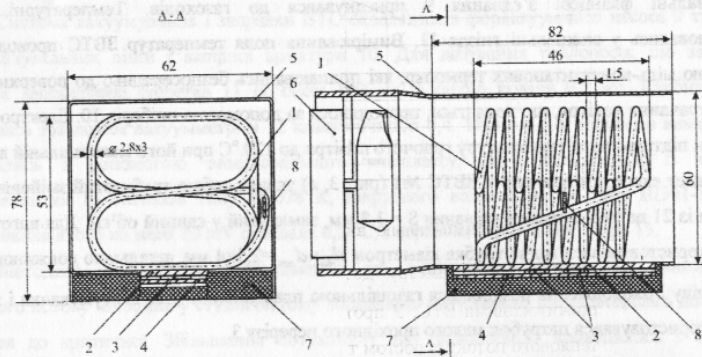


Рис. 4. Теплопередавальний пристрій на основі ЗВТС для охолодження елементів РЕА:

1 – трубчастий змійовик; 2 – мідна пластина; 3 – електронагрівач; 4 – фіксатор; 5 – корпус ТП; 6 – осьовий вентилятор; 7 – теплоізоляція; 8 – заправний патрубок

Макет експериментального ЗВТС був виготовлено із нержавіючої сталі трубки діаметром $d_{\text{вн}} \times d_{\text{зов}} = 2,8 \times 3$ мм загальною довжиною 1,5 м і уявляв собою змійовикову конструкцію у вигляді дев'яти S-образних петель, замкнених у єдиний об'єм. Загальна довжина трубок у зоні випарювання складала 342 мм. Змійовик 1 у зоні нагріву припаювався до одного з боків мідної пластини 2 розміром 50×52 мм, товщиною 1,5 мм. Для імітації роботи тепловіддаючого РЕА служили два електронагрівачі 3, які встановлювалися на другий бік мідної пластини з використанням теплопровідної пасти і притискувалися фіксатором 4. Відведення тепла

здійснювалось повітрям, що прокачувалось через корпус ТП 5 осьовим вентилятором 6. Температура мідної пластини з боку нагрівачів і температура трубок ЗВТС у зоні охолодження визначалась з допомогою термопар. Мідна пластина і електронагрівачі теплоізолювалися 7. Для вакуумування, заправки та герметизації ЗВТС використовувався патрубок 8.

У четвертому розділі надані експериментальні результати, їх аналіз і узагальнення.

Відповідно з відомими фізичними уявленнями про вірогідні механізми кризових явищ у ВТС, сформульованих в дослідженнях М.К. Безродного, передбачалось, що і для двофазного капілярного ВТС наступ кризи повинно бути пов'язано з втратою сталості структури парорідинного потоку в умовах зустрічного руху потоків пари і рідини. Межа теплопереносу у ВТС з організованою циркуляцією теплоносія характеризується критичними значеннями приведеної швидкості пари, що залежать від тиску і роду проміжного теплоносія.

На рис. 5. надано зіставлення експериментальних даних, одержаних для ВТС $d_{\text{вн}} = 2-4$ мм ($Bo < 4,5$) з організованою (рис. 5, а) і неорганізованою (рис. 5, б) циркуляцією теплоносія, з розрахунковою залежністю по кризах теплопереносу у ВТС (1). Прямі експериментальні дані надані у вигляді залежності критерію сталості С.С. Кутателадзе K_x (4) від критерію тиску K_p .

$$K_x = W_{\text{кр}}^* \sqrt{\rho^* / \rho} / \sqrt{g(\rho' - \rho^*)} \quad (4)$$

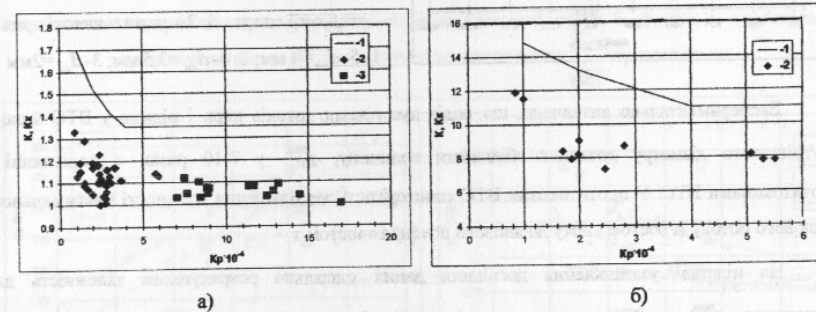


Рис. 5. Зіставлення експериментальних і розрахункових даних по кризах теплопереносу у ВТС з організованою (а) і неорганізованою (б) циркуляцією теплоносія:

1 - розрахункові дані по (1); 2, 3 - експериментальні дані; 3 - теплоносії – хладон 113; 4 - теплоносії – етанол

Із рис. 5. видно, що в області малих розмірів ВТС проявляється тенденція зниження сталості при зменшенні коефіцієнту K_x в 1,3÷1,4 рази, але загальний характер залежності зберігається, що свідчить про принципову погодженість механізмів і закономірностей наступу кризових явищ для капілярних ВТС з термосифонами більших внутрішніх діаметрів ($d_{\text{вн}} > 6$ мм).

Результати апроксимації дослідних даних дозволяють уточнити коефіцієнт C у (1) для відповідних типів кризового явища у ВТС малого внутрішнього діаметру ($1,5 < Bo < 4,5$). Для ВТС з неорганізованою циркуляцією теплоносія (тип кризи - підвисання плівки рідини) - $C=6,2$ при $K_p < 10^4$ і $C=1,05$ при $K_p > 10^4$; для ВТС з організованою циркуляцією теплоносія (тип кризи - зривання рідини поверхні верхобіжної плівки) - $C=52$ при $K_p < 10^4$ і $C=7,8$ при $K_p > 10^4$.

У роботі вивчався вплив тиску проміжного теплоносія і геометрії випарної зони ВТС на величину граничного теплового потоку. Як видно із рис. 6, при d_{on}/L_n (0,018 граничне теплове навантаження у термосифонах при $1,5 < Bo < 4,5$ фактично не залежать від величини d_{on}/L_n , що пов'язано з досягненням парою граничної швидкості, і що якісно погоджується з експериментальними даними, одержаними для ВТС великих розмірів ($d_{on} \geq 7$ мм) іншими авторами.

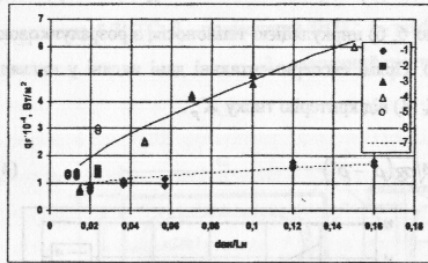


Рис. 6. Залежність щільності граничного теплового потоку q_F^{\max} у протитокових ВТС ($1,5 < Bo < 4,5$) від відносних розмірів зони випарювання; кут нахилу $\phi=90^\circ$: 1-3 теплоносій - хладон 113; 4, 5 - теплоносій - етиловий спирт; 6, 7 - узагальнюючі криві; 1, 5- $d_{on}=4$ мм; 2, 4- $d_{on}=3,5$ мм; 3- $d_{on}=2$ мм

Експериментально визначено, що поділ зустрічних потоків пари і рідини у ВТС малого внутрішнього діаметру дозволяє збільшити величину q_S^{\max} у 7-10 разів, в порівнянні з протитоковими ВТС. У протитокових ВТС спостерігається збільшення щільності максимального теплового потоку із ростом тиску до значень $P=(0,15 \div 0,2) \cdot P_{кр}$.

На підставі узагальнення досвідних даних одержана розрахункова залежність для визначення q_S^{\max} у ВТС малого внутрішнього діаметру із неорганізованою циркуляцією теплоносія ($1,5 < Bo < 4,5$):

$$q_S^{\max} = c_1 \cdot (\rho' / \rho'')^{1,7}, \quad (5)$$

де $C_1=4 \cdot 10^9$ - експериментально одержаний коефіцієнт.

Залежність (5) доцільно використовувати для розрахунку q_S^{\max} у вертикальних ВТС при відносній довжині зони нагріву $d_{on}/L_n \leq 0,18$, в інтервалі наведених тисків $0,04 < P/P_{кр} < 0,3$.

Дослідження характеристик ТА типу газ-газ і ПП на основі ЗВТС проводилися при різних положеннях у просторі (рис. 7). Встановлено, що працездатність ЗВТС у значній мірі залежить від

сили гравітації. Розташування змійовика у полі сил тяжіння визначає початковий розподіл теплоносія у об'ємі ЗВТС і величину гідростатичного напору у трубках, що впливає на "запуск" двофазного механізму переносу тепла.

Визначено, що на працездатність ЗВТС впливають такі технологічні фактори як: величина заправки, наявність газу в об'ємі ЗВТС, що не конденсується і кількість гілок змійовика. Найбільш ефективна робота ЗВТС спостерігалася при ступенях заправки $\epsilon=45-50\%$ від внутрішнього об'єму ЗВТС. Запуск недостатньо відвакуумованих ЗВТС проходив при більшій різниці температур між зонами нагрівання і охолодження, а робота ЗВТС характеризувалася меншими значеннями потужності, що передається. При збільшенні кількості гілок змійовика, термічний опір ЗВТС зменшується.

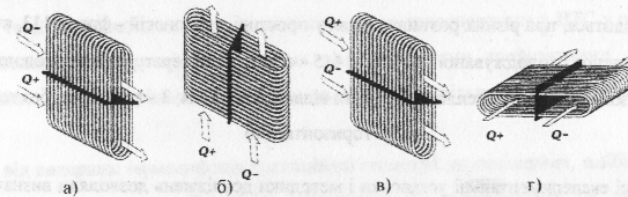
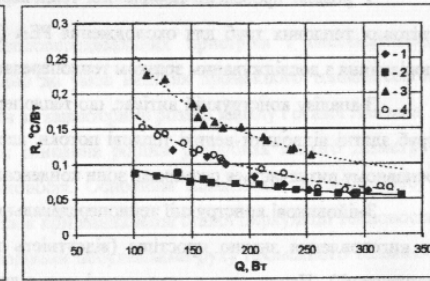
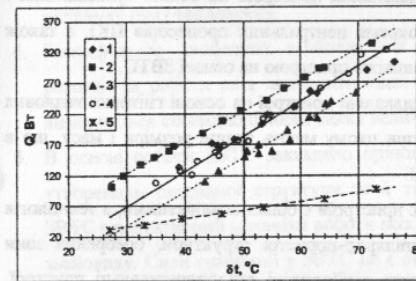


Рис. 7. Робочі положення ЗВТС у просторі:

а - вертикально, зона підведення тепла нижче зони відведення тепла; б - боком; в - вертикально, зона підведення тепла вище зони відведення тепла; г - горизонтально



а) б)

Рис. 8. Кількість тепла, що передає ТА на основі ЗВТС, в залежності від різниці температур гріючого і охолоджуючого потоків на вході у ТА (а) і термічний опір ТА на основі ЗВТС в залежності від потужності, що передається (б), теплоносій - фреон 113, $\epsilon=45\%$:

1-4 - для ТА на основі металевого ЗВТС ($Re=1400$); 5 - для ТА на основі полімерного ЗВТС ($Re=400$); 1 - боком; 2, 5 - горизонтально; 3 - вертикально (зона підведення тепла вище зони відведення тепла); 4 - вертикально (зона підведення тепла нижче зони відведення тепла)

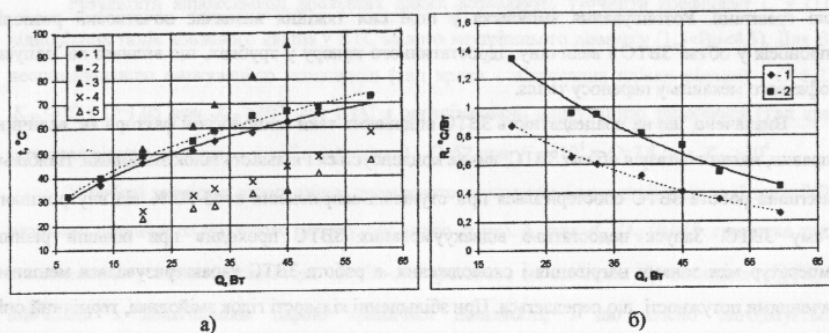


Рис. 9. Температура у основних зонах ТП (а) і термічний опір ТП (б) в залежності від потужності, що підводиться, при різних розташуваннях у просторі, теплоносія - фреон 113, $\epsilon=45\%$: 1, 2, 3 - температура охолоджуваної пластини; 4, 5 - середня температура зони охолодження; 1, 4 - вертикально, зона підведення тепла нижче зони відведення тепла; 3 - те ж саме, без теплоносія; 2, 5 - горизонтально

Створені експериментальні установки і методики досліджень дозволяли визначити основні теплопередавальні характеристики "капілярних" ВТС (критичний тепловий потік), теплообмінних апаратів і теплопередавального пристрою на основі ЗВТС (тепловий потік, що передає ТА, термічний опір) з відносною похибкою вимірювань 4,1 і 8,2% відповідно.

У розділі проведено порівняння теплопередавальних пристроїв на основі пульсаційних і гнітових теплових труб для охолодження РЕА (зокрема центральних процесорів ПК), а також порівняння з досліджуваним зразком теплопередавального пристрою на основі ЗВТС.

З аналізу конструкцій витікає, що теплопередавальні пристрої на основі гнітових теплових труб здатні відводити великі теплові потоки, але при цьому мають значні розміри і масу, що в основному визначається розмірами зони конденсації.

Змійовикові конструкції теплопередавальних пристроїв є більш компактними, а технологія їх виготовлення значно простіше (відсутність капілярно-пористої структури, обрешітки зони конденсації). Нарощування потужності, що відводять змійовикові теплопередавальні пристрої, досягається при розвитку поверхні теплообміну у зоні випарювання і конденсації за рахунок збільшення довжини трубок і кількості гілок. Характер зміни термічного опору для пульсаційних теплових труб і ЗВТС якісно схожий, однак перші «вимагають» більшого температурного напору між зонами нагрівання і охолодження. У низці випадків, для нормальної (сталой) роботи пульсаційних теплових труб необхідні додаткові пружні об'єми або клапани.

У розділі також наведено методику для розрахунку і проектування теплообмінних апаратів типу газ-газ на основі ЗВТС, проведено зіставлення експериментальних і розрахункових даних.

ВИСНОВКИ

1. ВТС малого внутрішнього діаметру по своїх геометричних характеристиках відповідають термосифонам з $d_{\text{ен}}/L_{\text{к}} < 0,2$ і $d_{\text{ен}}=2-4\text{мм}$. При малих розмірах ВТС ($1,5 < \text{Bo} < 4,5$) проявляється тенденція зниження сталості структури двофазного потоку при зменшенні коефіцієнту $K_{\text{к}}$ у 1,3-1,4 рази і зменшення щільності максимального теплового потоку порівняно з ВТС більшого розміру ($d_{\text{ен}} > 6\text{мм}$, $\text{Bo} > 8$).
2. Режими роботи і гідродинамічні явища у ВТС малого внутрішнього діаметру ($1,5 < \text{Bo} < 4,5$), у загальному випадку, подібні режимам роботи звичайних ВТС ($\text{Bo} > 8$), а причини настання і тип кризового явища погоджуються із результатами одержаними Безродним М.К. Межа сталості роботи ВТС може бути встановлена по узагальненій залежності (1) для розрахунку порушення сталості течії двофазного потоку, що викликає кризи теплопереносу у ВТС з організованою і неорганізованою циркуляцією теплоносія з поправочними коефіцієнтами, враховуючими вплив зменшення внутрішнього діаметру на величини щільностей максимальних теплових потоків.
3. Перехід від випарних термосифонів традиційної геометрії до капілярних, найбільш доцільний для апаратів типу газ-газ. Зниження собівартості на виготовлення ТА досягається при об'єднанні всіх індивідуальних ВТС у єдиному змійовику. Максимальна теплотехнічна ефективність теплообмінного апарата типу газ-газ при переході від окремих термосифонів до змійовикових забезпечується комплектацією ТА плоскими змійовиками, нормальними до напрямку руху теплоносія.
4. Класифікацію двофазних змійовикових теплопередавальних пристроїв і систематизацію режимів їх роботи слід проводити відповідно до умов кипіння проміжного теплоносія, що визначається співвідношенням таких величин як характерний розмір каналу і сталості Лапласа.
5. В основі роботи ЗВТС закладено принцип скипання рідини у трубках малого діаметру з утворенням снарядної структури течії теплоносія. Основним механізмом теплопереносу у ЗВТС є колективний механізм роботи всіх гілок при виникненні сталості циркуляції теплоносія у змійовику. Сили гравітації у ЗВТС не є основними побудниками руху проміжного теплоносія при роботі пристрою, але можуть робити істотний вплив на його працездатність. Основний внесок у працездатність ЗВТС вносять рушійні сили, що виникають у процесах пароутворення і конденсації.
6. Конструктивні форми теплообмінних апаратів на основі ЗВТС варто віднести до "гнучких" конструкцій, що піддаються простим змінам у технологічному відношенні. Можлива область використання ЗВТС знаходиться у сфері забезпечення теплових режимів тепловиділяючих елементів РЕА, а також у ТА для енергозберігаючих технологій, систем кондиціонування та

вентиляції. Для практичного застосування доцільні ЗВТС замкнутого типу з характерними внутрішніми розмірами еквівалентних діаметрів 2-4 мм.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І ІНДЕКСИ

F, S - площі поверхні і поперечного перерізу, м²; d - діаметр, м; L, h - довжина, висота, м; Q - тепловий потік, Вт; q - щільність теплового потоку Вт/м²; S - площа поперечного перерізу, м²; t - температура, °C; P - тиск, Па; W - швидкість, м/с; δ - стала Лапласа; K_c - критерій сталості; $K_p = P\delta/\sigma$ - критерій тиску; σ - коефіцієнт поверхневого натягнення Н/м; ϵ - ступінь об'ємного заповнення рідкою фазою теплоносія; ρ - щільність, кг/м³; τ - прихована теплота пароутворення, Дж/кг; R - термічний опір, °C/Вт; ϕ - об'ємний паровміст; $Re = W \cdot d_{\text{зов}}/\nu$ - число Рейнольдса; Bo - число Бонда; max - максимальне значення; min - мінімальне значення; S - відноситься до поперечного перерізу; F - до поверхні нагріву; n - відноситься до ділянки нагріву; вн. - внутрішній; зов. - зовнішній; ', " - відноситься до рідини і пари; кр. - критичний.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Борисов В.В., Захарченко А.Ф., Кожелупенко Ю.Д., Коба А.Л., Хаджибуєд И. Экспериментальное исследование характеристик теплообменного аппарата на основе змеевикового испарительного термосифона. // Холодильная техника и технология. - 2002. - № 1. - С. 32-34.

Особистий внесок: огляд літератури, участь в створенні експериментальної установки і в експериментальному дослідженні, представлення результатів, підготовка матеріалів до публікації.

2. Borisov, V., Buz, V., Coba, A., Kuznetsov, I., Zacharchenko, A., Smyrnov, G., "Modeling and Experimentation of Pulsating Heat Pipes" // Proceedings of the 12th International Heat Pipe Conference, 2003, Moscow-Kostroma-Moscow, 19-24 May, pp. 220-225.

Особистий внесок: огляд літератури, підготовка матеріалів до публікації.

3. Захарченко А.Ф. Экспериментальное исследование критических тепловых потоков в капиллярных испарительных термосифонах. // Холодильная техника и технология. - 2005. - № 2. - С. 25-27.

4. Захарченко А.Ф. Теплообменные аппараты на основе капиллярных испарительных термосифонов. // Холодильная техника и технология. - 2005. - № 3. - С. 10-12.

5. Захарченко А.Ф. Экспериментальное исследование характеристик двухфазного теплопередающего устройства для терморегулирования элементов радиоэлектронной аппаратуры. // Холодильная техника и технология. - 2005. - № 4. - С. 5-8.

АНОТАЦІЯ

Захарченко О.Ф. Теплопередавальні характеристики теплообмінних апаратів на основі змійовикових випарних термосифонів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - "Технічна теплофізика та промислова теплотехніка". - Одеська державна академія холоду. Одеса, 2006.

Робота присвячена вивченню основних теплотехнічних характеристик теплообмінних апаратів та теплопередавальних пристроїв на основі змійовикових випарних термосифонів (ЗВТС).

У роботі наведені експериментальні результати по дослідженню критичних теплових потоків у капілярних випарних термосифонах з організованою та неорганізованою циркуляцією теплоносія ($d_{\text{ов}}=2-4$ мм; $Bo<4,5$). Визначені фактори, що впливають на критичний тепловий потік. Вивчено режими роботи та гідродинамічні явища у капілярних термосифонах, отримані результати зіставлені з відомими даними для термосифонів більших розмірів ($d_{\text{ов}}>6$ мм).

На основі ЗВТС розроблені конструкції та проведено експериментальні дослідження: теплообмінного апарата типу газ-газ та теплопередавального пристрою для охолодження елементів радіоелектронних пристроїв. Ґрунтуючись на результатах експериментальних досліджень, визначені основні теплопередавальні характеристики та теплові режими даних пристроїв. Виявлено основні конструктивно-технологічні фактори, що впливають на їхню працездатність.

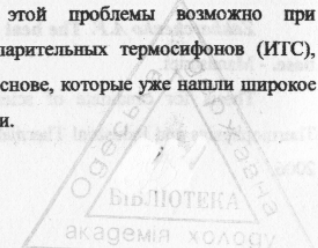
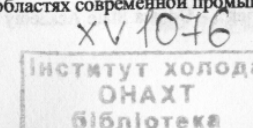
Ключові слова: змійовиковий випарний термосифон, теплообмінний апарат, критичний тепловий потік, теплопередавальний пристрій.

АННОТАЦИЯ

Захарченко А.Ф. Теплопередающие характеристики теплообменных аппаратов на основе змеевиковых испарительных термосифонов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 - «Техническая теплофизика и промышленная теплотехника». - Одесская государственная академия холода. Одесса, 2006.

На сегодняшний день свою актуальность сохраняют вопросы экономии материальных и топливно-энергетических ресурсов. Успешное решение этой проблемы возможно при использовании в качестве теплопередающих устройств испарительных термосифонов (ИТС), тепловых труб (ТТ) и теплообменных аппаратов (ТА) на их основе, которые уже нашли широкое применение во многих областях современной промышленности.



Известно, что уменьшение диаметра труб при поперечном обтекании благоприятно влияет на рост интенсивности теплоотдачи при не столь существенном росте аэродинамических сопротивлений, как это имеет место для условий течения в каналах. Поскольку в неоребрённых ИТС, применяемых для ТА типа газ-газ термические сопротивления процессу теплопереноса в зонах нагрева и охлаждения полностью определяются внешней стороной, то, с этой точки зрения, целесообразно стремиться к минимизации диаметров ИТС.

Эффективность такого мероприятия, как уменьшение диаметров ИТС для применения в ТА типа газ-газ, зависит от возможности, одновременно уменьшая диаметр ИТС, не увеличивать их количество, т.е. не увеличивать объёмы трудозатрат на изготовление ИТС, включая такие операции как внутреннюю очистку поверхностей, дегазацию, заправку, герметизацию, контроль и т.д. Такое технологическое решение возможно, если использовать, прошедшие технологическую апробацию, такие устройства как коллекторные ИТС или пульсационные тепловые трубы, которые можно определить и как "змеевиковые" ИТС.

В работе представлены экспериментальные результаты по исследованию критических тепловых потоков в капиллярных испарительных термосифонах с организованной и неорганизованной циркуляцией теплоносителя ($d_{ин} = 2-4$ мм; $Bo < 4,5$). Определены влияющие критический тепловой поток факторы.

На основе змеевиковых ИТС разработаны конструкции и проведены исследования ТА типа газ-газ и теплопередающего устройства для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры. Основываясь на результатах экспериментальных исследований, определены основные теплопередающие характеристики и тепловые режимы данных устройств. Выявлены конструктивно-технологические факторы, влияющие на их работоспособность.

В работе проведен обзор теплопередающих устройств на основе пульсационных и фитильных ТТ для охлаждения РЭА (в частности центральных процессоров персональных компьютеров), а также сравнение с экспериментальным образцом ТУ на основе ЗИТС.

Ключевые слова: змеевиковый испарительный термосифон, теплообменный аппарат, критический тепловой поток, теплопередающее устройство.

THE SUMMARY

Zakharchenko A.F. The heat exchangers on the evaporative thermosyphons serpentine type base. - Manuscript.

Thesis for candidate of science (Engineering) degree by specialty 05.14.06 – "Technical Thermophysics and Industrial Thermal Engineering". - Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa, 2006.

The dissertation is devoted to study the basic operation characteristics of heat exchangers on the evaporative thermosyphons serpentine type base.

The experimental researches by definition maximal heat ability of the thermosyphon of the capillary type ($d_{in} = 2-4$ mm; $Bo < 4,5$) with the organized and unorganized circulation of the working liquid are resulted. The factors influencing on a critical heat flow are determined. The investigated modes of operations and thermodynamic phenomena in capillary thermosyphon are compared with the known data for the large sizes thermosyphon ($d_{in} > 6$ mm).

The designs of the heat exchangers of gas - gas type and the heat transfer device for temperature stabilization of the radioelectronic equipment on evaporative thermosyphons serpentine type base are developed and the experimental researches were provided. Based on results of experimental researches the basic heat transfer characteristic and thermal modes these devices are determined. The constructive - technology factors influencing for operating ability these devices are revealed.

Key words: evaporative evaporative thermosyphons serpentine type base, heat exchanger, critical heat flux, heat transfer device.