

Автореферат
К 89

599

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

КУЗНЕЦОВ ІГОР ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.565.83-97:53.072.8

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПУЛЬСАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ**

Спеціальність - 05.14.06 Технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика.

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук



Одеса 2006

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор НДС Одеської державної академії холоду **Смирнов Генріх Федорович**

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Горбенко Геннадій Олександрович**, зав. каф. аерокосмічної теплотехніки національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ» МОН України.

кандидат технічних наук, доцент, **Афанасьєв Борис Анатольович**, Одеська державна академія холоду МОН України, доцент кафедри технічної термодинаміки.

Провідна установа – Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться 22 червня 2006 р. об 11 годин в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.087.01 в Одеській державній академії холоду за адресою: вул. Дворянська, 1/3 м. Одеса 62026 Україна.

3 дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за адресою: вул. Дворянська, 1/3 м. Одеса 62026 Україна

Автореферат розіслано 19 травня 2006 р.

ради

Мілованов В.І.

1

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Автономні теплопередавальні пристрої - теплові труби (ТТ) і термосифони (ТС) широко застосовуються в різних галузях сучасної теплотехніки. Особливо актуально їхнє застосування в системах терморегулювання радіоелектронної й обчислювальної техніки, теплообмінному устаткуванні, технологічних процесах, критичних до дотримання температурних режимів. Однак, широке застосування цих пристроїв найчастіше стримує висока собівартість і складність виготовлення.

З початку 90-х років японськими інженерами запропонований новий тип автономних теплопередавальних пристроїв, названий пульсаційними тепловими трубами (ПТТ). ПТТ являють собою змієвиковий канал капілярних розмірів, що перетинає зони нагрівання й охолодження і заповнений двофазним теплоносієм. Конкретна реалізація й конструкція ПТТ дуже різноманітна. ПТТ можуть бути виготовлені з капілярної трубки, що навивається між джерелом і стоком тепла. Капіляр ПТТ може бути служити ребром радіатора. Капілярний канал може формуватися у масиві конструкції пристрою і т.д. Основною перевагою ПТТ у порівнянні з іншими автономними теплопередавальними пристроями є відсутність капілярно-пористої структури й здатність роботи при будь-якій орієнтації у полі сил тяжіння. Усе це, дає підставу вважати ПТТ вартою уваги альтернативою ТТ і ТС.

Незважаючи на десятилітні дослідження роботи ПТТ, на сьогоднішній день усе ще важко давати рекомендації з приводу доцільності застосування ПТТ у тій чи іншій області теплотехніки. Насамперед, відсутнє розуміння причин виникнення теплопереносу в ПТТ. Немає також обґрунтованих фізичних уявлень, що давали б можливість зрозуміти за рахунок чого, при відсутності капілярної структури, можливий перенос тепла проти сил тяжіння. Відсутнє розуміння, де закінчується область випарних термосифонів і здійснюється перехід до того, що називається ПТТ. Не відомі також граничні можливості даних пристроїв по максимальній тепловій потужності, мініальному термічному опоріві і т.д. Відсутнє також розуміння, наскільки стабільна робота таких пристроїв. Існуючі в різних дослідженнях експериментальні результати й припущення про фізичні механізми дії ПТТ не дають на це відповіді. Не існує єдиної думки про механізми теплопереносу і виникнення циркуляції в ПТТ. Усі ці фактори підкреслюють актуальність експериментальних досліджень та моделювання теплопередавальних характеристик ПТТ.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконувалася відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки й техніки в Україні в області «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та АПК»; законодавчих актів: Закон України №74/94-ВР від 01.07.94 р. «Про енергозбереження»; Постанови Кабінету Міністрів

XV 1977
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
бібліотека

Одеська державна академія холоду

України №583 від 05.02.97 р. «Про комплексну державну програму енергозбереження України»; Постанови Кабінету Міністрів України №256-р від 31.03.99 р. «Про використання паливно-енергетичних ресурсів та скорочення технологічних витрат теплової енергії», та ін.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розробка основ теорії пульсаційних теплових труб. Для досягнення поставленої мети були поставлені і вирішені такі *основні задачі дослідження*:

- розробити методики експериментального дослідження теплопередавальних характеристик ПТТ, обробки та зіставлення експериментальних даних;
- експериментально дослідити теплопередавальні характеристики типового зразка ПТТ;
- розвинути фізичні уявлення о режимах роботи та механізмах теплопереносу у ПТТ;
- розробити методику розрахунку термічного опору ПТТ;
- експериментально визначити умови стабільної роботи ПТТ:

Об'єктами дослідження є пульсаційні теплові труби.

Предметом дослідження є теплопередавальні характеристики ПТТ та розрахункові методики визначення термічного опору ПТТ.

Методи дослідження. При вирішенні зазначених задач використовувались методи експериментального визначення теплопередавальних характеристик та аналітичного дослідження процесів теплообміну.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- уперше експериментально виявлена незалежність роботи окремих гілок ПТТ, яку можна вважати проявом "індивідуального механізму дії" ПТТ;
- запропоновано наближену модель теплопереносу в ПТТ, що дозволяє визначати термічний опір на основі уявлень про "індивідуальний механізм дії";
- уперше експериментально виявлено, що для стабільної роботи ПТТ необхідна присутність у контурі пружних об'ємів, що грають роль акумуляторів механічної енергії;
- експериментально показано, що наявність у теплоносії неконденсуючихся газів негативно впливає на теплопередавальні характеристики ПТТ і стабільність її роботи;
- експериментально досягнути щільності теплового потоку до 50 МВт/м^2 у поперечному перерізі капіляра;

На основі отриманих результатів у дисертації сформульовані і захищаються такі **наукові положення**:

1. Різниця тисків, що викликається неузгодженістю фаз виникнення та зникнення мікрошарів рідини на стінках двох сусідніх гілок випарника ПТТ, визначає переміщення двофазного середовища у відповідному напрямку та служить фізичним підґрунтям «індивідуального механізму дії» ПТТ.

2. Для стабільної роботи ПТТ потрібно щоб конструкція або окремі елементи ПТТ мали необхідні властивості для акумулювання механічної енергії пульсації.

Обґрунтованість і достовірність отриманих даних визначається надійністю методики експериментальних досліджень, добрим узгодженням результатів розрахунків по моделі із власними експериментальними даними, а також із результатами досліджень інших авторів у тих випадках, коли малася досить надійна інформація про умови дослідів. Вірогідність результатів і обґрунтованість висновків також визначається представницьким характером експериментальних досліджень і об'єктивною оцінкою величини похибок вимірів, з урахуванням статистичної ймовірності отриманих середніх величин. Правильність прийнятих модельних допущень підтверджено зіставленням аналітичних розрахунків з експериментальними результатами, як самого здобувача, так і з експериментальними даними інших авторів.

Практична цінність роботи полягає в тому, що результати досліджень дозволяють створити основи інженерного розрахунку теплообмінних апаратів із застосуванням ПТТ або тепловідводів для РСА на їхній основі, а також об'єктивно проаналізувати ефективність подібних пристроїв. Експериментально визначені особливості роботи ПТТ можуть використовуватися як критерій вибору ПТТ у якості теплопередавального пристрою, а умови, що забезпечують стабільну роботу повинні враховуватися при проектуванні ПТТ.

Особистий внесок здобувача. Дана робота виконана в 1996-2005рр. на науково - дослідницькій базі лабораторії кафедр СТР і ТМО ОДАХ. У дисертації викладені результати досліджень, виконаних автором самостійно та у співавторстві із співробітниками лабораторії. Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики проведення експерименту, включаючи обробку експериментальних даних. Разом із Гардой А.Н. були виконані експерименти на макеті №1. Здобувачем були виконані експериментальні дослідження на макеті №2. Разом із науковим керівником, сформульовані основні положення фізичної моделі ПТТ і на її основі підібрані емпіричні коефіцієнти. На основі запропонованої моделі проведено зіставлення власних експериментальних даних і експериментальних даних інших дослідників. Разом із науковим керівником підготовлені публікації по темі.

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися автором на II Російській національній конференції по теплообміну, Москва 2000; I й II Міжнародному семінару "Безкомпресорні системи охолодження" Одеса 1999 і 2001, а також на наукових семінарах каф. ТМО ОДАХ 2002 - 2005 р. Крім того, результати, викладені в дисертації, представлялися співавторами робіт на міжнародних конференціях: Міжнародній конференції-виставці у Лісабоні (Португалія 1998); 11й Міжнародній конференції по тепловим трубам, (Токіо 1999); 12й Міжнародній конференції по тепловим трубам, (Москва 2002).

Публікації. Основний зміст дисертації викладений у трьох статтях, надрукованих у професійних періодичних журналах, що відповідають вимогам ВАК України; 6 друкованих праць представлені у вигляді тез доповідей у збірниках наукових праць міжнародних конференцій і семінарів.

Структура й об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури й додатків. Робота містить 119 сторінок тексту, 32 малюнків і список літератури з 78 найменувань.

Зміст роботи

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертації, відображений зв'язок із державними програмами, сформульовано мету й задачі дослідження. Наведено наукові положення, конкретний особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації й публікації.

У першому розділі наведений огляд експериментальних і теоретичних робіт із дослідження пульсаційних теплових труб і моделювання їх роботи. Уперше, пульсаційну теплову трубу, запропонували у 1971 р. Смирнов Г.Ф. і Савченков Г.А. (Авт. свид. №504065 кл. F28D 15/00).

Японські винахідники під керівництвом Akachi H. розробили змієвикові пульсаційні теплові труби трьох основних типів:

- циркуляційні ПТТ із клапанами;
- замкнуті в кільце ПТТ без клапанів;
- не замкнуті в кільце ПТТ, або ПТТ найпростішого типу.

Відомі на сьогоднішній день конструкції ПТТ можна також розділити на три типи:

- Тепловідводи - радіатори, ребра й підніжжя яких є пульсаційною тепловою трубою. У цих конструкціях ПТТ не мають вираженої транспортної зони.

- Теплопередавальна ланка. ПТТ цієї конструкції використовуються для передачі теплового потоку від джерела тепла до теплостоку і мають чітко виражену транспортну зону.

- Теплорозгалужувальна ланка - плоскі ПТТ. Виготовляються у вигляді пластин, усередині яких сформований змієвиковий канал. Ці конструкції не мають виражених зон підводу, відводу й транспорту теплоти.

Усі типи конструкцій вигідно відрізняються від аналогічних конструкцій, заснованих на інших типах ТТ, відсутністю капілярних структур, технологічністю й компактністю виготовлення.

На сьогоднішній день серед авторів розглянутих робіт не існує єдиної точки зору про причини, що викликають коливальний рух теплоносія й переміщення рідини із зони охолодження в зону нагрівання. Невідомі навіть гіпотетичні припущення про фізичні причини, що забезпечують стійкий і інтенсивний двофазний тепломасообмін, у тому числі і проти сил тяжіння. В літературі

відсутні відомості про фізичні моделі й методики, що дозволяють розраховувати термічний опір ПТТ, здійснювати конструкторські й оптимізаційні розрахунки пристроїв із ПТТ.

Відповідно до цього були сформульовані наступні задачі досліджень:

1. Розвинути фізичні уявлення про процеси, що протікають у ПТТ і здійснити їх математичне моделювання.
2. Розробити методику розрахунку термічного опору ПТТ.
3. Розробити експериментальний стенд ПТТ для визначення теплопередавальних характеристик ПТТ, перевірки фізичних уявлень і верифікації методики розрахунку.
4. Виконати експериментальні дослідження ПТТ.
5. Провести аналіз отриманих результатів. Зіставити дані розрахунків і експериментів.

У другому розділі описана техніка експериментального дослідження й методика проведення експериментів. Перший макет (Рис. 1), використаний на початковому етапі, являв собою ПТТ найпростішого типу і мав чотири петлі з нержавіючого капіляра внутрішнім діаметром 1 мм і товщиною стінки 0,25 мм. Довжини зони нагрівання й охолодження становили по 165 мм, довжина транспортної ділянки - 90 мм. У зонах нагрівання й охолодження капіляр був припаяний до мідних пластин розміром 170×270 мм товщиною 1,5 мм.

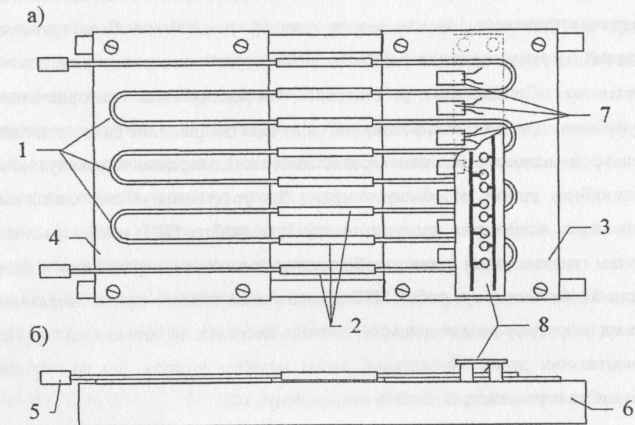


Рис.1 Схема першого експериментального макету.

1 - гілки ПТТ; 2 - транспортні ділянки ПТТ; 3 - плата нагрівання ПТТ; 4 - плата охолодження ПТТ; 5 - заправні штенгелі ПТТ; 6 - рама ПТТ; 7-нагрівачі ПТТ.

Для виміру поля температур ПТТ на макеті було встановлено 34 мідь-константанових термопар, підключених до автоматизованого вимірювального комплексу. Термопары були встановлені на пластини з нижньої сторони. У транспортній зоні термопары припаювалися на стінку капіляра. Як теплоносії на даному макеті використовувалася дистильована вода. Дегазована кип'ятінням вода заливалася в ПТТ. Необхідний ступінь заповнення досягався випарюванням надлишку теплоносія через один із заправних штенгелів. Ступенем заповнення ПТТ рідиною називали відношення об'єму рідини, що залишилася в контурі ПТТ до об'єму всього контуру. Наступ стаціонарного режиму контролювали по сталості температур плат нагрівання й охолодження. У стаціонарному режимі проводили не менш трьох разів фіксування температурного поля ПТТ з інтервалом у 5 хвилин між вимірами. Обробка результатів вимірів включала осереднення температур стінки капіляра по зонах нагрівання, транспорту й охолодження, а також температур плат нагрівання й охолодження. Відсутність тенденції до зміни цих середніх температур у послідовно зафіксованих вимірах температурного поля ПТТ була доказом виходу ПТТ на сталий режим.

Другий макет, показаний на Рис. 2, проектувався з урахуванням досвіду, накопиченого при роботі з першим макетом. Для виготовлення ПТТ використовувалася капілярна трубка зі сталі 1X18N10T внутрішнім діаметром 0.96 мм і зовнішнім діаметром 1.6 мм. Довжина зони нагрівання й охолодження становила 140 мм, а зона транспорту - 150 мм. В остаточному варіанті був використаний нагрівач потужністю 350 Вт, виготовлений на основі мідної пластини розмірами 230×250×6 мм. Стабільність роботи ПТТ забезпечувалась використанням спеціально сконструйованих пружних сифонних об'ємів. При заправленні за допомогою регулюючого гвинта сифони встановлювалися в середнє положення, заправлення виконувалося з розрахунку відносини об'єму рідини до об'єму контуру, без урахування об'ємів сифонів. Деформація сифонів через підвищення тиску в контурі при роботі ПТТ компенсувалося пружиною з регулюючим гвинтом таким чином, щоб показчик положення переміщався відносно середнього положення. Таким чином, при роботі ПТТ підтримувався заданий ступінь заправлення контуру.

Також, у другому розділі докладно описана методика проведення експерименту й обробки експериментальних даних. Проведений аналіз похибки показав, що при прийнятій методиці виміру, похибка отриманих результатів не перевищує 10%.

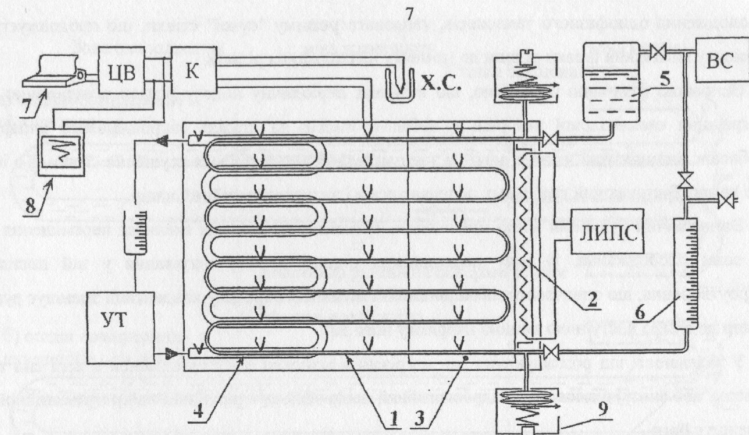


Рис. 2. Схема другого експериментального макета.

1 - гілки ПТТ, 2 - нагрівач, 3 - пластина нагрівача, 4 - змійовик охолодження, 5 - заправна ємність, 6 - бюретка, 7 - система виміру, 8 - самопис, 9 - сифон.

У третьому розділі викладені фізичні уявлення про роботу ПТТ і сформульована математична модель індивідуальної дії. У ПТТ, на відміну від усіх інших типів теплових труб, сили, що переміщують теплоносії із зони нагрівання в зону охолодження та із зони охолодження в зону нагрівання, існують не безупинно, а періодично, змінюючи один одного. Такий специфічний механізм теплопереносу був названий пульсаційним механізмом дії.

На підставі експериментально винайдені незалежності роботи окремих гілок ПТТ запропонована фізична модель пульсаційного механізму, яку було названо «моделлю індивідуальної дії». У рамках цієї моделі вводяться такі поняття й визначення:

1. Змійовик ПТТ умовно розбивається на гілки - канали, що мають зону нагрівання, транспорту й охолодження. Дві сусідніх гілки, що мають спільну зону охолодження, утворюють елементарну комірку.
2. Періодичність роботи ПТТ полягає в тому, що рідина із зони охолодження періодично повертається в зону нагрівання.
3. Рушійні напори, що повертають рідину із зони охолодження в зону нагрівання визначаються періодичною зміною інтенсивності теплообміну в зоні охолодження і в зоні нагрівання. Визначальна роль при цьому належить процесам утворення й зникнення плівки рідини в основі парових снарядів у зоні теплопідводу.
4. Комбінований механізм теплообміну характеризується наявністю: теплообміну при мікрошаровому випарі, конвективно-кондуктивного теплообміну на стадіях прогріву й

охлаждения однофазного теплоносителя, теплового режима "сухой" стінки, що продовжується від моменту висихання плівки рідини до моменту надходження рідини.

5. Основною фізичною причиною, що визначає періодичну подачу рідини поперемінно в зони нагрівання елементарної комірки, є небаланс тисків на стадіях мікрошарового випару. Цей небаланс виникає тоді, коли в одній із зон нагрівання вже відбулося осушення стінки, а в іншій – ще немає. Виникаючий при цьому перепад тисків і визначає рушійний напір.

6. Виникаючий рушійний напір між гілками елементарної комірки викликає переміщення рідини із зони охолодження. В міру надходження рідини в зону нагрівання у ній посилюється пароутворення, що одночасно з посиленням інтенсивності процесу конденсації зменшує рушійний напір до нуля з наступною зміною напрямку його дії.

7. У залежності від розташування зон нагрівання відносно зон охолодження в полі сил тяжіння (зверху або знизу) відповідний гідростатичний напір збільшує рушійний напір пульсаційної дії або зменшує його.

Вважається, що робота ППТ носить "циклічний" характер. Кожен цикл складається з 4 стадій.

Стадія I - затоплення зони нагрівання і-ї гілки порцією теплоносителя (Рис. 3а). Наступає після того, як в і-й гілці відбулося осушення зони нагрівання, при цьому в сусідніх зонах (і+1) продовжується зріст тиску. Виникаючий при цьому рушійний напір приводить до переміщення теплоносителя з і+1-ї гілки, в і-ю. В міру переміщення теплоносителя відбувається "відкриття" зони охолодження в і+1-ї гілці, і отже, падіння рушійного напору. Надалі, при надходженні рідини в зону нагрівання і-ї гілки через деякий інтервал часу τ_2 , необхідний для перегріву рідини, в і-ї гілці з'являється "зустрічний" потік пари, що ще більше знижує рушійний напір. З урахуванням цього, а також приймаючи до уваги вплив гідралічного напору при вертикальному або похилому положенні «елементарної комірки» $|\beta| \neq 0$, можна записати рушійний напір, що виникає в елементарній комірці, що об'єднує і-ю та і+1-ю гілку:

$$[q_c \Pi_s L_s \varphi_s - k_2 (t_s - t_2) \Pi_c L_c]_{i+1} \frac{\Delta \tau}{r (S_0 L_0 \varphi_0)_{i+1}} \left(\frac{\partial \rho^*}{\partial P} \right)^{-1} - [q_c \Pi_s L_s \varphi_s - k_2 (t_s - t_2) \Pi_c L_c]_i \frac{\Delta \tau}{r (S_0 L_0 \varphi_0)_i} \left(\frac{\partial \rho^*}{\partial P} \right)^{-1} = \Delta P$$

де q_c - щільність теплового потоку в зоні нагрівання; Π_s, Π_c - периметри гілки в зонах нагрівання і охолодження, відповідно; L_s, L_c - довжини гілки в зоні нагрівання й охолодження, відповідно; φ_s - паровміст у зоні нагрівання гілки; k_2 - коефіцієнт теплопередачі в зоні охолодження; t_s, t_2 - температури насичення теплоносителя і холодильника, відповідно; $\Delta \tau$ - малий інтервал часу; r - теплота пароутворення; S_0, L_0, φ_0 - площа перетину, довжина і паровміст гілки.

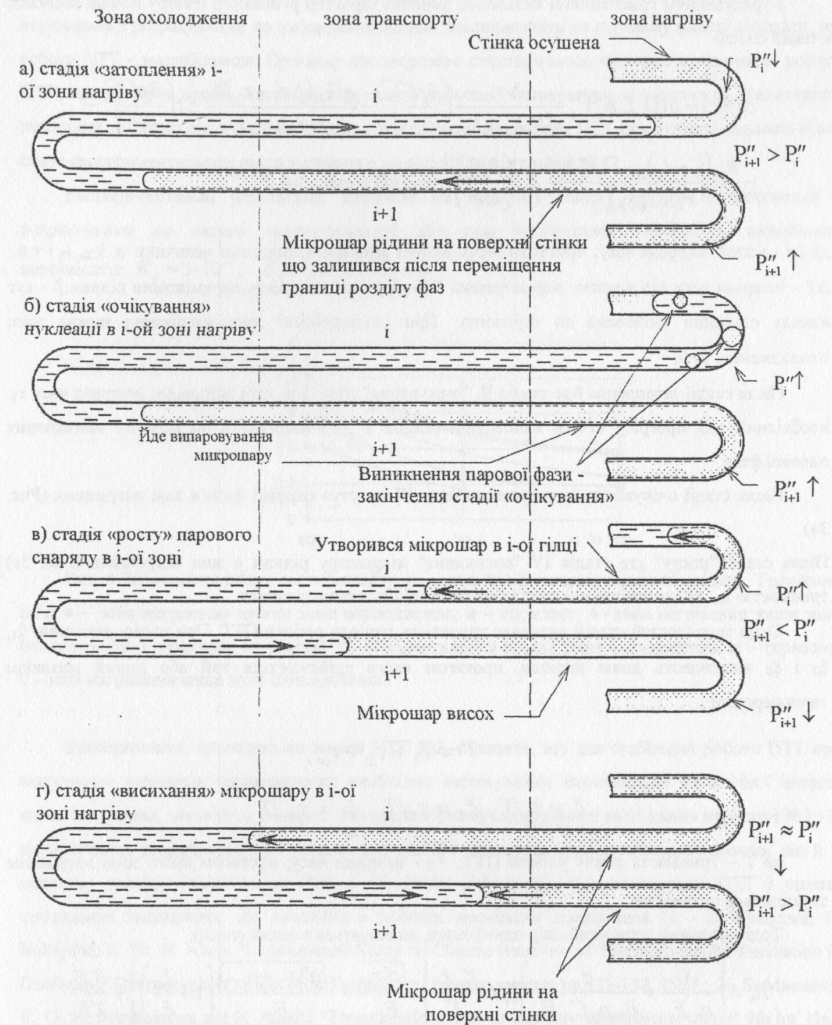


Рис. 3. Картини, що ілюструють фізичні уявлення про гідродинамічні та теплові явища, що існують в елементарній комірці ППТ упродовж циклу.

З урахуванням гравітаційної складової, змінний характер рушійного напору можна записати в такий спосіб:

$$\Delta P(\tau) = q(\Pi_e L_e \varphi_e)_{i+1} \frac{\Delta \tau}{r(S_0 L_0 \varphi_0)_{i+1}} \left(\frac{\partial \rho''}{\partial P} \right)^{-1} - \frac{q \Pi_{ei} (\Delta \tau' - \tau_2) W}{r(S_0 L_0 \varphi_0)_i} \Delta \tau \left(\frac{\partial \rho''}{\partial P} \right)^{-1} - \frac{k_{20} (t_s - t_2)_{0i+1} \Pi_c W \Delta \tau'}{r(S_0 L_0 \varphi_0)_{i+1}} \Delta \tau \left(\frac{\partial \rho''}{\partial P} \right)^{-1} + \rho' g (1 - \varphi) L_0 \sin \beta$$

де $\Delta \tau$ - малий інтервал часу, протягом якого можна вважати незмінними величини φ , k_{20} , t_s і т.п.; $\Delta \tau'$ - інтервал часу від початку переміщення; W - середня швидкість переміщення рідини; β - кут нахилу площини змійовика до горизонту. При розташуванні зони нагрівання нижче зони охолодження, $\beta > 0$.

Після стадії затоплення йде стадія II, "очікування" (Рис. 3б), якої відповідає інтервал часу τ_2 , необхідний для прогріву стінки капіляра й рідини в зоні нагрівання до початку виникнення парової фази.

Після стадії очікування починається стадія III «росту» парової фази в зоні нагрівання (Рис. 3в).

Після стадії "росту" йде стадія IV "висихання" мікрошару рідини в зоні нагрівання (Рис. 3г) тривалістю τ_{oc} . Після закінчення стадії "висихання" цикл повторюється.

Сума тривалостей стадій визначає тривалість періоду роботи ПТТ. При цьому величини ξ_1 , ξ_2 і ξ_3 визначають долю періоду, протягом якого здійснюється той або інший механізм теплопередачі:

$$T = \bar{\tau}_0 + \tau_2 + \tau_{oc},$$

$$\xi_1 = \bar{\tau}_0 / T, \quad \xi_2 = \tau_2 / T, \quad \xi_3 = \tau_{oc} / T,$$

де T - тривалість циклу роботи ПТТ, $\bar{\tau}_0$ - інтервал часу, протягом якого зона нагрівання залишається осушеною.

Тоді загальний термічний опір однієї гілки, визначиться в такий спосіб:

$$R_0 = \left[\frac{1}{\alpha_c F_c} + \frac{\tau}{\delta_w \rho_w C_w F_E} \right] \xi_1 + \frac{K_A \xi_2}{\lambda'} \left[\frac{\sqrt{a' \tau_2}}{F_E} + \frac{\sqrt{a' (\tau_2 + \tau_{oc})}}{F_C} \right] \left(1 + \frac{\xi_3}{\xi_2} \right) + \frac{\delta_0 \xi_3}{\lambda' F_E}$$

Термічний опір усієї ПТТ, відповідно до принципу індивідуальної дії, визначається як:

$$R_{ПТТ} = \frac{R_0}{n}; \quad \text{де } n - \text{число індивідуальних каналів.}$$

У четвертому розділі проведено обговорення й аналіз експериментальних даних, а також їх порівняння з розрахунками по наближеній моделі. Експерименти на першому макеті показали, що робота ПТТ є нестабільною. Причому неодноразово спостерігалось часткове припинення роботи ПТТ, при якому в деяких гілках рееструвалися пульсації температури, а в інших ні. Хаотичність поведінки температури в сусідніх гілках і працездатність частини ПТТ при зупинці окремих гілок стало експериментальним підтвердженням моделі «індивідуальної дії».

Експериментальні результати, отримані на першому макеті, якісно погоджуються з розрахунками по моделі «індивідуальної дії» при використанні наступних емпіричних коефіцієнтів: $K_q = 3 \cdot 10^{-4}$; $K_d = 10^{-2}$; $K_A = 1$

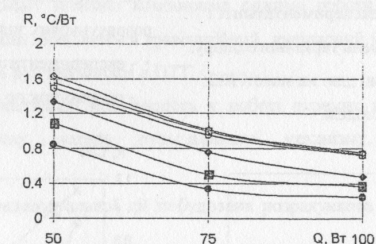


Рис. 4 З'ясування даних експерименту на макеті №1 із розрахунками по моделі. Термічний опір ● - зона нагрівання нижче зони охолодження, ■ - горизонт, ◆ - зона нагрівання вище зони охолодження. Розрахунки по моделі. ○ - зона нагрівання нижче зони охолодження, □ - горизонт, ◇ - зона нагрівання вище зони охолодження.

Експерименти, проведені на макеті ПТТ №2, показали, що для стабільної роботи ПТТ при відсутності елементів переключення необхідне застосування акумулятора механічної енергії, яким, наприклад, може бути сифон. Результати експериментальних досліджень на макеті №2 і їх з'ясування з розрахунками по моделі при тих же значеннях емпіричних коефіцієнтів, що й у першому випадку, показані на Рис. 5. Достатня інформація про конструкції ПТТ і умов проведення досліджень, що наведена в роботах японських дослідників (1 - S. Maezawa, R. Nakajima, K. Gi, H. Akachi "Experimental Study on Chaotic Behavior of Thermohydraulic Oscillation in Oscillating Thermosyphon". Heat Pipe Technology, Pergamon press pp.131-137, 1997.; 2 - S. Maezawa, K. Gi, A. Minamisawa and H. Akachi "Thermal performance of capillary tube thermosyphon" 9th Int. Heat Pipe Conference. Albuquerque, New Mexico. 1994.) дозволила провести порівняння їх експериментальних даних із результатами розрахунків по моделі. При використанні тих же значень емпіричних коефіцієнтів отримане гарне узгодження. Результати порівняння в графічній формі показані на Рис.6 - Рис.8.

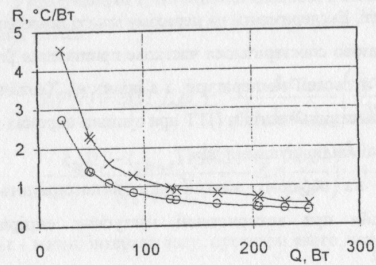


Рис 5. Зіставлення експериментальних і розрахункових значень термічного опору.
 × - експериментальні дані на макеті №2;
 ○ - розрахунок по моделі.

12

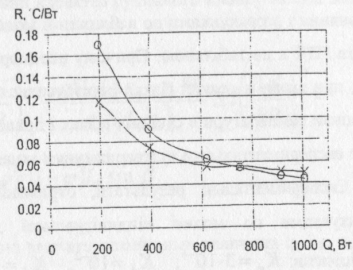


Рис 6. Зіставлення експериментальних і розрахункових значень термічного опору.
 × - експериментальні дані [1] Вода. d=2mm;
 ○ - розрахунок по моделі.

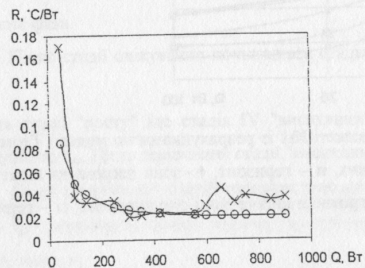


Рис 7. Зіставлення експериментальних і розрахункових значень термічного опору.
 × - експериментальні дані [1] R142b, d=2mm; ○ - розрахунок по моделі.

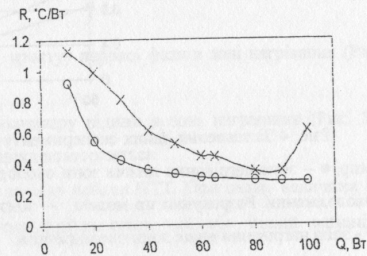


Рис 8. Зіставлення експериментальних і розрахункових значень термічного опору.
 × - експериментальні дані [2] R142b, d=1mm; ○ - розрахунок по моделі.

У дисертації розглянуті перспективні області застосування ПТТ. Проведено критичний аналіз рекомендацій з використання ПТТ як основи для теплообмінних апаратів і теплопередавальних пристроїв запропонованих у роботах японських фахівців.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена методика й експериментальні макети ПТТ дозволили одержати достовірну інформацію про залежності термічного опору ПТТ від основних визначальних параметрів: температур зон підводу й відводу тепла, переданого теплового потоку, орієнтації у полі сил тяжіння, ступеня заправлення й роду теплоносія.

2. Запропонована в роботі методика обробки первинних дослідних даних дозволила одержати числові значення визначальних параметрів, що однозначно характеризують роботу ПТТ.

3. Експериментально досліджена залежність термічного опору ПТТ від теплового потоку в діапазоні до 30 Вт на одну гілку. Отримані результати якісно погоджуються з результатами подібних досліджень інших авторів.

4. Стійкий теплоперенос у змієвикових ПТТ, що супроводжується пульсаційним переміщенням двофазного теплоносія, пояснюється існуванням "пульсаційного механізму". Сутністю цього механізму є періодичність і поділ у часі дії основних рушійних сил. При цьому можливі комбіновані режими роботи ПТТ, при яких крім пульсаційного, істотними виявляються гравітаційний, капілярний чи інші механізми, що спонукують або гнітять рух теплоносія в ПТТ.

5. Виявлена експериментально незалежність у роботі окремих гілок ПТТ, дозволила сформулювати фізичну модель пульсаційного механізму, названу моделлю "індивідуальної дії".

6. На основі моделі індивідуальної дії побудована розрахункова методика визначення термічного опору ПТТ.

7. Зіставлення розрахунків по моделі "індивідуальної дії" з експериментальними даними по термічних опорах ПТТ отриманих як здобувачем, так і з даними інших дослідників, показують добре якісне й кількісне узгодження. Це підтверджує правильність основних положень, закладених у модель індивідуальної дії.

8. Експерименти показали, що для підвищення стабільності роботи ПТТ, при відсутності елементів переключення, необхідне застосування акумулятора механічної енергії, яким може бути сильфон. При великому числі гілок, роль такого природного акумулятора механічної енергії можуть грати стисливі об'єми теплоносія або пружні елементи стінки.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф., Гарда А.Н. «Экспериментальное исследование характеристик пульсационных тепловых труб с неразделенными каналами». //Промышленная теплотехника. – 1999, т.21, №6. – с.112-116.

Особистий внесок: експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.

2. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф. «Экспериментальное и математическое моделирование характеристик пульсационных тепловых труб». // Холодильная техника. – 2005. – т. 97. №5. – С. 61-69.

Особистий внесок: експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації.

3. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф. «Экспериментальное исследование характеристик пульсационных тепловых труб». // Холодильная техника. – 2005. – т. 98. №6. – С. 43-47.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.

4. Smirnov H.F., Kuznyetsov I.O., Garda A.N.: The Plate Finned Heat Exchangers With Multichannel coil Thermal Syphons Applications Theoretical Analysis. // International Conference and Exhibit Lisbon, Portugal. June 15-18. 1998.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.

5. Кузнецов И.О., Смирнов Г.Ф., Гарда А.Н. “Экспериментальное исследование пульсационных тепловых труб с неразделенными каналами” // РНКТ-II 1998, Россия, Москва, 26-30 Октября, 1998. МЭИ, т.4, с.346-367.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації та доповідь на конференції.

6. Smirnov H.F., Kuznyetsov I.O., Buz V.N. and Borisov V.V. The approximated pulsating heat pipes theory and experimentation // Preprint. The XII IHPC. Tokyo. September, 1999.

Особистий внесок: експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації.

7. Smirnov H.F., Kuznyetsov I.O., Buz V.N., Borisov V.V., “Pulsating heat pipe theory and experimentation”. Presented at the International Workshop “Non Compression Refrigeration & Cooling” Odessa. Ukraine 1999. pp.121-125.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації та доповідь на конференції.

7. Smirnov H.F., Kuznyetsov I.O., Buz V.N., Borisov V.V., “Pulsating heat pipe theory and experimentation”. Presented at the International Workshop “Non Compression Refrigeration & Cooling” Odessa. Ukraine 1999. pp.121-125.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації та доповідь на конференції.

8. Smirnov H.F., Kuznyetsov I.O., Buz V.N., Borisov V.V., “The approximate pulsating heat pipe theory”. II International Workshop “Non Compression Refrigeration & Cooling” Odessa. Ukraine 2001. pp.72-78.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації та доповідь на конференції.

9. V.Borisov, V.N.Buz, A.L.Coba, I.O.Kuznetsov, A.S.Zacharchenko, H.Smirnov “Modelling and Experimentation of Pulsating Heat Pipes”; Coll. of Preprints of Papers of 12th IHPC May 19-24, 2002, Moscow. Paper B-3.

Особистий внесок: розробка та виготовлення експериментальних макетів ПТТ, розробка методики дослідження, експериментальні дослідження, обробка експериментальних даних, розрахунки по моделі, зіставлення експериментальних даних та розрахунків, підготовка матеріалів до публікації.

АННОТАЦИЯ

Кузнецов И.О. Экспериментальное исследование и математическое моделирование теплопередающих характеристик пульсационных тепловых труб. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – «техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Одесская государственная академия холода. Одесса. 2006.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию работы и математическому моделированию пульсационных тепловых труб. Пульсационные тепловые трубы (ПТТ) – особый класс автономных двухфазных теплопередающих устройств, перемещение теплоносителя в которых происходит за счет сил инерции. Простота конструкции, отсутствие капиллярной структуры и способность работать при любой ориентации, делают этот тип тепловых труб интересным в качестве альтернативы

другим типам тепловых труб. Однако объективный анализ возможности применения ПТТ невозможен без понимания процессов протекающих в них, возможности расчета их теплофизических характеристик.

В результате экспериментальных исследований была обнаружена независимость работы отдельных ветвей ПТТ. Это послужило основой предложенной приближенной модели действия ПТТ. На основе анализа сил, действующих в отдельно взятой ветви ПТТ – элементарной ячейке и допущении о цикличности протекающих в ней процессов, были оценены длительности характерных стадий периода работы и термические сопротивления соответствующих этим стадиям механизмов теплопереноса. Общее термическое сопротивление ПТТ определялось как среднее между ними, взвешенное по их длительности, в суммарном времени цикла работы. В модели использованы три эмпирически подобранных коэффициента, введенных в модель вследствие недостаточной изученности на сегодняшний день процессов теплообмена, протекающих в ПТТ. Проведенное сравнение результатов расчета по предложенной модели с результатами экспериментальных исследований, как самого соискателя, так и других исследователей, при одних и тех же значениях эмпирических коэффициентов, показало удовлетворительное качественное и количественное согласование, что подтверждает правильность данного подхода. Обнаруженная соискателем нестабильность работы ПТТ и необходимость использования в конструкции ПТТ определенных упругих объемов – аккумуляторов механической энергии пульсаций для обеспечения этой стабильности не учитывалась и не могла быть учтена в предложенной модели вследствие несовершенства имеющихся на сегодняшний день представлений о нестационарных процессах теплообмена в двухфазных системах, характерных для ПТТ. Это может служить указанием на круг вопросов, решение которых необходимо для построения более точных моделей действия ПТТ.

Ключевые слова: пульсационные тепловые трубы, моделирование, методики исследования, теплопередающие характеристики, математическая модель, пульсационный механизм, индивидуальный механизм действия.

АНОТАЦІЯ

Кузнєцов І.О. Експериментальні дослідження і математичне моделювання теплопередавальних характеристик пульсуючих теплових труб. - Рукопис.

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - "технічна теплофізика і промислова теплоенергетика". - Одеська державна академія холоду. Одеса. 2006.

результатами експериментальних досліджень, як самого здобувача, так і інших дослідників, при тих самих значеннях емпіричних коефіцієнтів, показало задовільне якісне й кількісне узгодження, що підтверджує правильність обраного підходу.

Ключові слова: пульсуючі теплові труби, моделювання, методики дослідження, теплопередавальні характеристики, математична модель, пульсуючий механізм, індивідуальний механізм дії.

THE SUMMARY

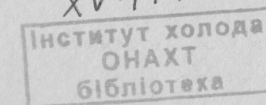
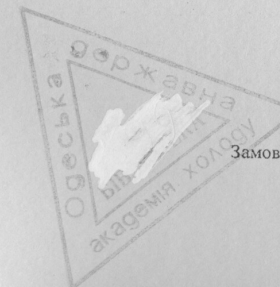
Kuznyetsov I.O. Experimental research and mathematical modeling of heat-transfer characteristics of pulsating heat pipes. - Manuscript.

Thesis for a 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 the experimental research of work and mathematical modeling pulsating heat pipes. Pulsating heat pipes (PHP) - a special class of two-phase autonomous heat-transfer devices where moving of the heat-carrier occurs due to inertial forces.

As a result of experimental researches the independence of work of separate branches of PHP has been found out. Basis of the offered approximated model of action of PHP has been offered. On the basis of the analysis of the forces working in separately taken branch PHP - an elementary cell, and an assumption about cyclic of processes in it, have been appreciated duration of characteristic stages of the period of work and thermal resistance of heat transfer mechanisms corresponding to these stages. The made comparison of results of calculation on the offered model with results of experimental researches, both the author, and other researchers, at the same values of empirical factors, has shown the satisfactory qualitative and quantitative coordination that proves the given approach.

Key words: pulsating heat pipes, modeling, techniques of research, heat transfer characteristics, mathematical model, pulsating mechanism, individual mechanism of action.



Видавництво «Формікс»

Замовлення 316 Обсяг 1/9 друк.арк.

Тираж 100 прим.