

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Гурова Дмитра Ігоровича

на тему: "Процеси теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинам",

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 «Електрична інженерія»

за спеціальністю 144 «Теплоенергетика»

Актуальність теми дисертаційної роботи.

За останні роки широкого застосування набуває використання нанорідин як робочого середовища для систем охолодження в електронній промисловості, системах утилізації теплоти в енергетичних об'єктах. В електронній промисловості спостерігається тенденція до мініатюризації пристроїв, а питомі величини теплових потоків, що вони виділяють, зростають експоненційно. Відповідно, виникають потреби у високоефективних системах охолодження, до яких відносяться випарно-конденсаційні системи з мініатюрними двофазними термосифонами. Нанорідини зарекомендували себе як особливі теплоносії, з унікальними теплофізичними властивостями, які спроможні забезпечити нормальний режим тепловідведення, де звичайні теплоносії створювали проблеми кризового характеру. Робота пов'язана з дослідженням теплопередавальних характеристик мініатюрних термосифонів, процесів теплообміну у випарно-конденсаційних системах з нанорідинами та підвищенням ефективності теплопередачі мініатюрних термосифонів.

Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт кафедри атомної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", а саме «Процеси тепломасообміну і гідродинаміки у мініатюрних двофазних теплопередаючих системах», шифр 2111-ф, номер держ. реєстрації 0118U003539 та «Тепломасообмін і гідродинаміка в одно- та багатофазних середовищах новітніх теплоносіїв для створення теплообмінників кріогенної техніки та радіолокаційних систем», шифр 2407-п, номер держ. реєстрації 0121U109681.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, наведених у дисертаційній роботі, забезпечується коректністю припущень, які лежать в основі виконаних наукових досліджень, а також застосуванням сучасних наукових підходів та методів. Було використано вже підтверджені розрахункові та експериментальні методики та обробку експериментальних даних. З метою перевірки достовірності отриманих даних проводилося порівняння з даними та результатами, що було отримано іншими

науковцями. Наукові результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для підготовки фахівців за напрямком 142 «Енергетичне машинобудування».

Наукова новизна сформульована у дисертації. В процесі вирішення поставлених задач одержано наукові результати:

- вперше запропоновано та використано в мініатюрних термосифонах (МТС) водну гібридну нанорідину (НР) з багатостінними вуглецевими нанотрубками та аттапульгітом (природним алюмосилікатом), в результаті отримано значне збільшення теплового потоку;

- вперше досліджено комплексний вплив концентрації наночасток та зміни коефіцієнту заповнення на теплопередавальну спроможність МТС, встановлено оптимальні рівні концентрацій для різних коефіцієнтів заповнення;

- отримано нові дані щодо дослідження деградаційних ефектів теплопередавальних характеристик МТС з гібридними НР у режимах зберігання та активного напруцювання;

- вперше запропоновано емпіричне рівняння для водного теплоносія з аморфним вуглецем для інженерних розрахунків максимальних теплових потоків в діапазоні кутів нахилу $20-60^\circ$ з використанням даних теплопередавальних характеристик вертикально розташованого МТС;

- вперше досліджено амплітудні та часові характеристики пульсацій температур для мініатюрних термосифонів, в яких як теплоносії використовується водна нанорідина на основі багатостінних вуглецевих нанотрубок з додаванням аттапульгіту з різним рівнем концентрації наночасток. Отримано нове емпіричне рівняння для визначення амплітуди пульсацій температур та досліджено вплив визначальних факторів на неї;

- отримано нові дані щодо ефективності теплопередачі ряду нових теплоносіїв, а саме водних нанорідин з додаванням аморфного вуглецю, багатостінних вуглецевих нанотрубок, синтетичного алмазу, аттапульгіту, суміші багатостінних вуглецевих нанотрубок і аттапульгіту, суміші аттапульгіту та монтмориллоніту для МТС. Сформовано рекомендації щодо підбору матеріалів наночасток для поліпшення ефективності теплопередачі та покращення теплопередавальних характеристик;

- вперше запропоновані нові емпіричні рівняння для розрахунку інтенсивності теплообміну у зонах нагріву мініатюрних термосифонів, в яких використовуються досліджені нанорідини.

Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутність порушення академічної доброчесності

Основні результати дисертаційної роботи за темою дисертації опубліковано у 14 надрукованих наукових працях, у тому числі 4 статті. 2 статті відносяться до фахових видань, що включено до міжнародних наукометричних баз SCOPUS, Q3, 1 – до наукових фахових видань України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття – додатково відображає результати дисертації у фаховому виданні; 10 тез доповідей та

матеріалів конференцій. Кількість публікацій за темою дослідження достатньо для захисту відповідно до Постанови КМУ №44 від 12.01.2022 зі змінами, внесеними згідно Постанови №341 від 21.03.2022. В публікаціях відображені наукові результати дисертації. Дисертація включає всю необхідну для її оцінки інформацію, містить основні положення, висновки і рекомендації. Її обсяг та оформлення відповідають вимогам МОН України.

Дисертація являється самостійною роботою здобувача, в якій сформульовано задачі дослідження, проаналізовано літературу з даної наукової проблеми. В тексті дисертаційної роботи не було знайдено порушень академічної доброчесності.

Структура дисертації складається з анотації, вступу, 7 основних розділів, висновків, списку використаних джерел, який включає 91 наукову роботу та додатку. Повний обсяг становить 198 сторінок та включає 12 таблиць, 58 рисунків.

У вступі обґрунтовано актуальності напрямку роботи, визначено об'єкт, предмет, мету та цілі дослідження. Наведені позиції наукової новизни отриманих даних та висновки, а також особистий внесок здобувача наукового ступеня доктора філософії. Представлено інформацію щодо апробації результатів досліджень та напрямки їх потенційного використання. Описано загальний обсяг дисертаційної роботи та його структуру.

У першому розділі автором проведено аналіз процесів тепло перенесення в термосифонах із застосуванням нанорідин. Розглянуто способи приготування нанорідин. Досліджено проблематику в питанні охолодження сучасної потужної електронної техніки, обґрунтовано переваги системами використання мініатюрних випарно-конденсаційних систем з нанорідинами у порівнянні з іншими охолоджувальними системами. Відзначено, що в переважній кількості опублікованих робіт проявляється однотипність у підборі теплоносія (наночастинки оксиду міді, алюмінію, титану, золота та вуглецеві нанотрубки) і фактично відсутні роботи з гібридними (багатокомпонентними) нанорідинами. Встановлено, що в літературі практично відсутні роботи що стосується перевірок з плином часу на надійність, деградацію нанорозчинів і ресурсні випробування. Встановлено, що механізми теплообміну в елементах мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинами досліджені поверхнево.

У другому розділі представлено конструкцію експериментального стенду, алгоритм випробувань, наведено перелік нанорідини, які було заправлено в мініатюрні термосифони для дослідження – традиційні (однокомпонентні), і комбіновані (гібридні) нанорідини, що складаються з суміші наночасток. Проведено прискорений тест на седиментацію: за місяць простою не було зафіксованою зміни кольору чи випадку наночасток у осад.

Приведено класифікацію похибок, обрано основні інструменти і обладнання, оцінено їх внесок у похибку вимірювань та обчислено похибки визначення усіх розрахункових величин.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу коефіцієнта заповнення мініатюрних термосифонів на їх теплопередавальні характеристики у разі використання різних нанорідин. Автор знайшов логічне пояснення збільшення теплового потоку в мініатюрних термосифонах, заповнених нанорідинами у порівнянні з тими, що заповнені водою, як наслідок зростання кількості центрів пароутворення в разі застосування нанорідин. Досліджено вплив коефіцієнта заповнення на термічний опір мініатюрного термосифона, який зростає в міру зменшення довжини нагрівача, що автор пов'язує з негативним впливом стовпа рідини над ділянкою кипіння. Максимальне зростання теплового потоку в термосифонах з нанорідинами у порівнянні з базовою рідиною зафіксовано на рівні 53%. Досліджено вплив кута нахилу мініатюрного термосифона на його теплові характеристики, знайдено оптимальний кут нахилу, що складає $40 - 70^\circ$, а також критичний кут нахилу, який складає 30° . Запропоновано емпіричне рівняння для водного теплоносія з аморфним вуглецем для прогнозування максимальних теплових потоків в діапазоні кутів нахилу $20-60^\circ$.

Четвертий розділ присвячено дослідженню інтенсивності теплообміну в мініатюрних термосифонів, а саме коефіцієнтів тепловіддачі у зоні нагріву та зоні конденсації, а також коефіцієнтів еквівалентної теплопровідності. В результаті експериментальних досліджень процесів теплообміну у мініатюрних термосифонах з водною нанорідиною з додаванням синтетичного алмазу встановлено збільшення еквівалентної теплопровідності до 20%, в порівнянні з водою і затулювання кризових явищ до 80% у відношенні до підведеного теплового потоку. Виявлена важливість вибору теплоносія. Встановлено, що для нанорідин синтетичного алмазу мало місце зростання інтенсивності тепловіддачі в зоні нагрівання до 180 %, в той час, як нанорідини на основі аморфного вуглецю, а також аттапульгіта не демонстрували зростання коефіцієнта тепловіддачі у порівнянні з чистою водою в зоні нагріву, а іноді навіть призводили до його зниження (до 30%). Автором наведено узагальнююче співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі у зонах нагріву мініатюрних термосифонів для досліджених нанорідин, що узагальнюють 80% отриманих експериментальних даних з розкидом $\pm 30\%$.

П'ятий розділ присвячено впливу концентрації наночастинок на теплопередавальні характеристики мініатюрних термосифонів, та визначенню його оптимального рівня. Дослідження проводилися на гібридній водній нанорідині на базі багатостінних вуглецевих нанотрубок з додаванням аттапульгіту з концентраціями 0,1%, 0,5% та 0,7%. Автором отримано важливий результат, що, по-перше, використання масових концентрацій наночастинок більше ніж 0,1%, призводить до поліпшення робочих характеристик, по-друге, оптимальні концентрації для кожної нанорідини індивідуальні. Встановлено, що зміна коефіцієнта заповнення створює певний зсув оптимального рівня концентрації, і він може відрізнятися навіть для одного теплоносія. Наведено оптимальні рівні концентрацій для досліджених коефіцієнтів заповнення.

У шостому розділі автором проведено аналіз пульсацій температур у зонах теплообміну мініатюрних термосифонів з нанорідинами. Наведені результати вимірювань пульсацій температури у верхній частині зони нагрівання мініатюрного термосифона з нанорідиною за різних теплових навантажень. Встановлено, що збільшення концентрації наночасток призводить до зменшення амплітуди пульсацій, але за низьких густин теплового потоку період пульсацій залишається великим. Автор узагальнив результати досліджень амплітуди пульсацій в залежності від теплового потоку для термосифонів з водною нанорідиною на базі вуглецевих нанотрубок і аттапульгіту з коефіцієнтом заповнення 0,44 в діапазоні зміни концентрацій 0,1–0,7% і надав відповідне узагальнююче рівняння.

Сьомий розділ присвячено ресурсним випробуванням, та перевірці наявності деградаційних ефектів з плином часу, які автор провів достатньо ґрунтовно. Випробування у режимі зберігання показали відсутність деградації й тенденцій до зміни термічного опору після 5 років консервування для дослідних зразків на базі синтетичного алмазу і на гібридній водній нанорідині на базі вуглецевих нанотрубок і аттапульгіту. Ресурсні випробування у режимі напрацювання проведені для водної нанорідини на основі вуглецевих нанотрубок і аттапульгіту і тенденцій до погіршення чи поліпшення термічного опору не спостерігалось. Таким чином, автором підтверджена можливість використання в мініатюрних термосифонах нанорідин, які на протязі періоду активної експлуатації, а також в період зберігання на змінюють своїх властивостей.

Практичне значення та реалізація отриманих результатів.

Отримані результати досліджень та емпіричні залежності мають практичну цінність для проектування вискоефективних систем охолодження на базі мініатюрних термосифонів для електронного обладнання, розрахунку коефіцієнтів теплообміну в мініатюрних термосифонах, підбору нанорідин, та їх оптимальних концентрацій. Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для підготовки фахівців за напрямком 142 «Енергетичне машинобудування» та входять до складу дисциплін: «Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках», «Основи наукових досліджень та планування експерименту».

Зауваження до дисертаційної роботи

1. В дисертації наведено ряд схожих графічних залежностей термічного опору термосифона від теплового потоку за різних коефіцієнтів заповнення (рис. 5.1 – 5.5). На графіках після експоненціального падіння термічного опору від теплового потоку, за певного теплового навантаження має місце його зростання, що пов'язано з критичними явищами. Було б не зайвим для даного режиму навести розрахункові параметри двофазного потоку – приведену, дійсну та відносну швидкість пари, швидкість «захливання», розраховану за співвідношенням Уолліса, дійсний об'ємний паровміст, густину пари для кращого відображення фізичної картини двофазного потоку

в мініатюрному термосифоні та порівняння із залежностями для початку кризових явищ в інших термосифонах.

2. В дисертації відсутні порівняння теплових характеристик мініатюрних термосифонів, заправлених нанорідиною, з характеристиками термосифонів, в яких застосовані інші методи інтенсифікації тепловіддачі при кипінні, наприклад, з нанесеним на внутрішній поверхні трубки мікропористого шару.

3. В термосифонах, заправлених водою, або водою з наночастинками, в області малих температур (20-30 °C) має місце глибоке розрідження, тому виникають значні коливання температури (до 40 °C), або, так звані, низькочастотні пульсації, що викликані перегріванням рідини відносно температури насичення до початку утворення парових бульбашок, рис.6.1. В дисертації немає виразного обґрунтування переваг водяних термосифонів в даному температурному діапазоні над термосифонами, заправленими низькокиплячими холодильними агентами, які б працювали під значним тиском зі стабільним кипінням без низькочастотних коливань. Проблему із «захлинанням двофазного потоку», внаслідок меншої на порядок теплоти фазового перетворення для фреонів, можна було б вирішити застосуванням термосифонів циркуляційного типу замість простих трубок.

4. В узагальнюючому співвідношенні для амплітуди пульсацій (формула 6.2) входить діаметр, вплив якого на амплітудно-частотні характеристики в даній роботі не досліджувався, оскільки досліди проведені лише на трубі діаметром 5 мм. Звідки показник степеню «1» при діаметрі?

5. В літературі опубліковано велика кількість робіт з процесів теплообміну в термосифонах різних діаметрів, включаючи мініатюрні. Автор не навів графічного порівняння експериментальних результатів власних досліджень з результатами досліджень інших авторів.

6. В роботі наведені два узагальнюючі рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі (4.3 та 4.4) в які увійшли лише 2 параметри – густина теплового потоку та ступінь заповнення зони кипіння без впливу масової концентрації наночастинок в рідині. В той же час концентрація наночастинок присутня в рівнянні для амплітуди пульсацій (6.2), причому у значній степені (– 0,72). Можливо було б доцільно виділити окремо дослідні дані, на основі яких отримано результат щодо впливу концентрації наночастинок на амплітуду пульсацій.

7. Зміст дисертації викладено у 7 розділах. При цьому, в деяких розділах, наприклад, 3, 4 представлено великий обсяг інформації описового характеру, в той час як науковий матеріал, що стосується пульсаційного режиму теплообміну, який наведений в розділі №6, висвітлений стисло. Було б не зайвим надати інформацію щодо технології отримання співвідношення (6.2), а саме впливу режимних та геометричних факторів на амплітуду пульсацій.

8. Автору не вдалось уникнути ряду «русизмів» в тексті дисертації під час її написання.

Вказані зауваження по дисертаційній роботі носять скоріше характер побажань і не впливають на зроблений автором висновок про

обґрунтованість, наукову новизну положень, висновків, рекомендацій та практичну цінність результатів досліджень.


Висновок про дисертаційну роботу

Одержані автором нові теоретично та експериментально обґрунтовані результати у сукупності розв'язують складне науково-практичне завдання розроблення високоефективних випарно-конденсаційних систем з мініатюрними двофазними термосифонами на основі нанорідин для охолодження високонапружених елементів електронних пристроїв.

Вважаю, що дисертація Гурова Дмитра Ігоровича "Процеси теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинами" виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, за своїм змістом та оформленням відповідає Наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Вимоги до оформлення дисертації» та задовольняє вимогам Постанови КМУ №44 від 12.01.2022 р (зі змінами, внесеними згідно Постанови КМУ №341 від 21.03.2022 р) «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» та чинним вимогам ОН України, а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – теплоенергетика, галузі знань: 14 – електрична інженерія.

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри теплоенергетики
та холодильної техніки Національного
університету харчових технологій,
доктор технічних наук, доцент

 Валентин ПЕТРЕНКО

