

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Гурова Дмитра Ігоровича
на тему «Процеси теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних
системах з нанорідинами»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Актуальність теми дисертації

Сучасний розвиток електроніки приводить до мініатюризації приладів, що в свою чергу, збільшує питому величину тепловиділення. Забезпечення температурного режиму елементів обладнання потребує застосування ефективних систем охолодження. Використання нанорідин в якості теплоносіїв для мініатюрних термосифонів може бути перспективним кроком на шляху вирішення наведених проблем. Рішення цієї задачі потребує комплексного підходу і проведення значної кількості дослідних робіт.

Робота присвячена актуальній темі: дослідження ефективності теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинами. Встановлення впливу режимних параметрів та геометричних характеристик на ефективність тепловіддачі при використанні моно- і гібридних нанорідин.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі полягає у використанні основних фізичних законів, на основі яких засновані принципи роботи замкнених конденсаційно- випарних термосифонів, застосування класичних методик проведення досліджень процесів гідродинаміки і теплообміну, порівнянні результатів тестових досліджень з літературними джерелами. Крім того, було визначені похибки експериментальних досліджень та узагальнення експериментальних даних.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. 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, з одночасним зменшенням термічного опору, що вказує на загальне суттєве покращення теплотехнічних характеристик системи.

2. Вперше досліджено комплексний вплив концентрації наночасток та зміни коефіцієнту заповнення на теплопередавальну спроможність МТС. Встановлено оптимальні рівні концентрацій для різних коефіцієнтів заповнення, та визначено наявність різного діапазону оптимальних рівнів концентрацій нанорідини, що змінюється в залежності від співвідношення об'єму, що заповнений теплоносієм, до об'єму зони нагріву термосифону.
3. Отримано нові дані щодо дослідження деградаційних ефектів теплопередавальних характеристик МТС з гібридними НР у режимах зберігання та активного нагрівання.
4. 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.
5. Вперше досліджено амплітудні та часові характеристики пульсацій температур для мініатюрних термосифонів, в якості теплоносія в яких 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.
6. 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. Сформовані рекомендації щодо підбору матеріалів наночасток для поліпшення ефективності теплопередачі та покращення теплопередавальних характеристик.
7. Вперше запропоновані нові емпіричні рівняння для розрахунку інтенсивності теплообміну у зонах нагріву мініатюрних термосифонів, в якості теплоносія в яких використовуються досліджені нанорідини. Визначено, що значення коефіцієнтів тепловіддачі залежить як від густини теплового потоку, так і від значення коефіцієнту заповнення теплоносія.

Матеріал дисертації розширює та поглиблює наукові знання про процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах, вплив від використання нанорідин у ролі теплоносія та теплопередавальні характеристики мініатюрних термосифонів. Це дає можливість виконувати інженерні розрахунки при проектуванні мініатюрних термосифонів для систем охолодження.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі атомної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського, та входили до складу науково-дослідницьких програм та тем, 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 під керівництвом проф., д.т.н., проф. Кравця В. Ю.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання по дослідженню процесів теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинами виконано повністю, здобувач оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Гурова Д. І. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Теплоенергетика.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у роботу наукової школи кафедри «Теплообмін та гідродинаміка».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Гурова Дмитра Ігоровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Дисертація підготовлена на високому науковому та методичному рівні, рукопис має належну редакторську якість та відповідає встановленим вимогам до оформлення та подання друкованих робіт наукового характеру, мова та стиль роботи відповідають прийнятій інженерній методології.

Дисертація складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку літератури та додатку. Загальний обсяг дисертації 198 сторінок.

У вступі наводиться обґрунтування актуальності напрямку роботи, визначено об'єкт та предмет, мету та цілі дослідження, наукову новизну 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 представлено літературний огляд. Проаналізовано використання у різних напрямках фундаментальних робіт і конкретних міжгалузевих застосуваннях нанотехнологій. Розглянуто методи і технології у приготуванні нанорідин, проаналізовано переваги і недоліки кожного з них. Проаналізована перспективність застосування нанорідин в якості теплоносія у системах охолодження.

На підставі аналізу наукових робіт зроблено висновок про переваги використання випарно-конденсаційних систем у різних галузях техніки. У зв'язку зі зменшенням масо-габаритних характеристик приладів акцентовано увагу на мініатюрних системах.

Поточний стан цього напрямку досліджень свідчить про актуальність робіт й попит від промисловості. Сформульовані задачі досліджень.

У другому розділі представлено конструкцію експериментального стенду, на якому проводились дослідження теплопередавальних характеристик мініатюрних термосифонів з наноридиною в якості теплоносія. Розроблено методика.

В якості теплоносія обрано як перспективні традиційні (однокомпонентні), проте не достатньо досліджені нанорідини, так і комбіновані (гібридні) нанорідини, що складаються з суміші наночастинок.

Приведено аналіз похибок експериментальних досліджень, застосовані заходи щодо мінімізації цих похибок, обрано основні інструменти і обладнання, оцінено їх внесок у похибку вимірювань та обчислено похибки визначення усіх розрахункових величин. Величини похибок обчислення було проаналізовано і зроблено висновок про прийнятний рівень похибок при проведенні досліджень.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу нанорідин у якості теплоносія та коефіцієнту заповнення на теплопередавальні характеристики мініатюрних термосифонів. Визначено, що збільшення теплового потоку, який передається мініатюрним термосифоном, призводить до зменшення термічного опору, викликане зростанням кількості центрів пароутворення. Також проаналізовано режими роботи термосифонів, в залежності від теплового потоку починаючи з появи гейзерного ефекту, та закінчуючи переходом з бульбашкового розвиненого режиму кипіння до плівкового кипіння і виникнення кризи теплообміну. Зафіксовано, що збільшення коефіцієнту заповнення за рахунок зменшення довжини нагрівача призводить до збільшення термічного опору мініатюрного термосифону.

Дослідження кута нахилу показало, що оптимальний кут для нанорідин ідентичний до значень, що рекомендовані для води, і знаходиться в діапазоні 40-70°. В свою чергу критичний кут становить 30°. Запропоновано емпіричне рівняння для водного теплоносія з аморфним вуглецем для прогнозування максимальних теплових потоків в діапазоні кутів нахилу 20– 60°.

У четвертому розділі наведено основні величини, що характеризують інтенсивність теплопередачі мініатюрних термосифонів, а саме коефіцієнти тепловіддачі (у зоні нагріву, у зоні конденсації), а також коефіцієнти еквівалентної теплопровідності.

Дослідження нанорідин у якості теплоносія підтвердило доцільність використання їх у мініатюрних термосифонах.

Отримано емпіричні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі у зонах нагріву мініатюрних термосифонів для різних нанорідин, що узагальнюють 80% отриманих експериментальних даних з розкидом $\pm 30\%$.

П'ятий розділ присвячено дослідженню впливу концентрації наночасток на теплопередавальні характеристики мініатюрних термосифонів, та визначенню його оптимального рівня. Дослідження проводилися на гібридний водній нанорідині на основі багатостінних вуглецевих нанотрубок з додаванням аттапульгіту.

Визначено, що оптимальні концентрації для кожної нанорідини будуть індивідуальні, проте дослідження і підбір необхідно виконувати в ширшому діапазоні, і не обмежуватися діапазоном надмалих концентрацій (по типу 0,005...0,1%). Було отримано, що оптимальна концентрація наночасток у робочій рідині є функцією багатьох складових, до яких відносяться не тільки форма наночасток, їх характерні розміри, анізотропія, теплофізичні властивості, тощо, але і певний вплив має коефіцієнт заповнення теплоносієм мініатюрного термосифона. Наведено оптимальні рівні концентрацій для певних досліджених коефіцієнтів заповнення.

У шостому розділі досліджено явище пульсацій температур у зонах теплообміну мініатюрних термосифонів з нанорідинами. Розглянуто природу цього явища, та зазначено необхідність його дослідження, що пов'язано з можливим впливом на температуру електронного пристрою. Для термосифонів з водною нанорідиною на базі вуглецевих нанотрубок і аттапульгіту (коефіцієнт заповнення 0,44 та діапазон досліджених концентрацій 0,1–0,7%) отримано емпіричне рівняння для визначення амплітуди пульсацій в залежності від теплового потоку. На основі отриманого рівняння зроблено висновок, що збільшення витрати охолоджуючої рідини, концентрації наночасток, та безрозмірного комплексу ($d_{вн}/L_{зн}$) призводить до зменшення амплітуди пульсацій температури, крім того, збільшення коефіцієнта заповнення призводить до збільшення амплітуди пульсацій температур. Автором було виявлено, що відбувається збільшення періоду пульсацій при низьких густинах теплового потоку. Останнє наголошує на необхідності раціонального підбору мініатюрних термосифонів для системи охолодження, їх діаметрів, довжин, коефіцієнтів заповнення та теплоносіїв.

Сьомий розділ присвячено ресурсним випробуванням та перевірці наявності деградаційних ефектів з плином часу. Ресурсні випробування були розбиті на дві частини: перевірка у режимі зберігання впродовж 5 років: температурний діапазон 15–25°C, вологість 30–60%) та у режимі напруження (активний режим роботи, 350 годин при $Q=0,8Q_{max}$). Випробування у режимі зберігання показали відсутність деградації й тенденцій до зміни термічного опору після 5 років консервування для обох дослідних зразків. Випробування у режимі напруження проводилися для водної нанорідини на основі вуглецевих нанотрубок і аттапульгіту і тенденцій до погіршення чи поліпшення термічного опору не спостерігалось.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 14 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 1 стаття у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus, третій квартиль (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank та 1 стаття у виданні України, що додатково відображає результати дисертації.

Також результати дисертації були апробовані на 10 наукових фахових конференціях.

В наведених публікаціях в достатньо повній мірі відображено науковий зміст та основні результати дисертаційної роботи. Особистий внесок здобувача у всіх публікаціях, опублікованих у співавторстві та зарахованих за темою дисертації, є вагомим, що підтверджується особистою участю у проведенні виконаних робіт. В усіх публікаціях дотримуються принципи академічної доброчесності.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Не зважаючи на високий науковий рівень дисертації, її практичну значущість та актуальність по роботі є зауваження, а її окремі положення потребують пояснень:

1. При визначенні залежності повного термічного опору МТС від величини теплового потоку необхідно пояснити наявність екстремуму на кривих. Крім того, на основі аналізу наведених результатів досліджень бажано оцінити зміну положення точок максимального значення параметра на кривих і аргументувати це явище.

2. При визначенні $R_{\min} = f(K_3)$ (рис.3.9) збільшення K_3 відбувається за рахунок зменшення довжини нагрівача і появи додаткового стовпа води. Для аналізу такого ефекту необхідно визначити в якому стані знаходиться рідина у цій зоні і пояснити яким чином це впливає на роботу МТС.
3. Для визначення інтенсивності теплообміну в ЗН з НР пропонуються залежності (4.3) і (4.4) і застосовувати їх можливо для двох груп МТС. У роботі не наведена аргументація поділу НР на групи і, вірогідно, що вона не доцільна. Якщо НР між собою відрізняються складом, тоді доречним буде представлення відповідної залежності для кожної з них.
4. Потребує пояснення впливу на інтенсивність теплообміну в ЗК використання НР. Яким чином враховувалась товщина плівки конденсату? Бажано провести порівняння отриманих результатів з класичними дослідями плівкової конденсації для чистої пари на вертикальних поверхнях.
5. Бажано надати пояснення стосовно частотних характеристик окремих зон МТС. З чим пов'язана така різна амплітуда коливань? Яка розмірність A_i у залежності (6.2)?
6. Процеси, які відбуваються в МТС, в значній мірі, залежать від теплофізичних властивостей теплоносіїв. Бажано навести основні властивості нанорідин, які використовувались у дослідях (ст.142).

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Гурова Дмитра Ігоровича на тему «Процеси теплообміну в мініатюрних випарно-конденсаційних системах з нанорідинами» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Гуров Дмитро Ігорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Рецензент:

Професор кафедри атомної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського,
д.т.н.

Валерій ТУЗ