

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Борисенка Андрія Геннадійовича «Математичне та комп'ютерне моделювання теплообміну в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій»*, яку подано на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика

Підвищення ефективності перетворення енергії Сонця є пріоритетним напрямком розвитку сучасної науки. Термодинамічне перетворення має ряд суттєвих переваг, серед яких високий ККД, екологічна безпека при функціонуванні та утилізації, відсутність деградації, економічна доцільність. Більш широке впровадження такого типу перетворення неможливо без пошуку нових методів підвищення його теплової ефективності, яка на пряму залежить від ефективності системи прийому енергії Сонця. В роботі пропонується інтенсифікувати конвективний теплообмін в системі прийому шляхом додавання в теплоносії наночастинок різних матеріалів. Такий метод є новим та перспективним в сенсі підвищення властивостей передачі теплоти в базовому теплоносії. Тому тема дисертаційного дослідження Андрія Геннадійовича Борисенка є безумовно актуальною та своєчасною.

Представлена дисертація складається зі вступу та чотирьох розділів, в яких відображено зміст та науковий рівень досліджень, які проведені. В списку використаних джерел наведені відповідні посилання.

У вступі всебічно обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її мету та основні завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Обрані основні методи проведення досліджень.

У першому розділі міститься аналіз стану літератури за обраною тематикою, порівнюються різні типи систем перетворення сонячного випромінювання, визначаються переваги термодинамічного перетворення.

Автор багато уваги приділяє огляду сучасних методів інтенсифікації конвективного теплообміну в теплоприймачах сонячних термодинамічних станцій, всебічно характеризує кожен з них. Слід окремо зазначити, що основу огляду складають виключно сучасні, як правило закордонні, наукові праці. Це свідчить про те, що автор під час проведення досліджень узагальнює світовий досвід в даній галузі та пропонує нові наукові та технічні рішення.

В розділі на основі проведеного аналізу пропонується метод покращення конвективного теплообміну шляхом додавання в базовий теплоносії сонячних термодинамічних станцій наночастинок різних матеріалів. Таке додавання змінює теплофізичні властивості базової рідини, що покращує її властивості передавати тепло. Проведена систематизація наночастинок, які можна додавати в теплоносії, детально проаналізовані методи дослідження таких нанорідин.

Автор описав принцип роботи системи прийому сонячних

термодинамічних станцій на прикладі сонячної станції із параболоциліндричним концентратором. Обрана фізична модель для подальшого дослідження.

Другий розділ цілком присвячено побудові базової математичної моделі процесів теплопереносу в трубчатому теплоприймачі сонячної параболоциліндричної станції із нанорідинним теплоносієм. Базова модель будувалась з граничними умовами першого та другого роду. На основі такої моделі було розроблено комп'ютерний алгоритм, який базується на методі контрольних об'ємів. Окремо слід відзначити те, що в розділі описано інтегрування відповідних рівнянь математичної фізики, яке проводилось для побудови різницевих аналогів числового алгоритму. Розроблена математична модель – 3D рівняння енергії для нанорідинного теплоносія – в різницевому виді розщеплювалась на два одновимірних параболічних рівняння, які розв'язувались методом прогонки. Відповідна програма розрахунку була реалізована на мові програмування Python.

Із використанням власного програмного коду знайдені розподіли температур нанорідинного теплоносія в радіальному та повздовжньому напрямках, а також значення його середньомасової температури в системі прийому.

Застосування при моделюванні граничних умов першого та другого роду дало можливість провести верифікацію отриманих числових даних шляхом порівняння із даними тестової задачі, яка розв'язана в роботі аналітично. Автор досить докладно описує етапи створення аналітичного розв'язку задачі про ламінарний конвективний теплообмін в каналі круглого перетину. При порівнянні аналітичних та числових результатів отримано добрий збіг, що свідчить про адекватність запропонованого підходу.

В розділі багато уваги приділяється методам визначення теплофізичних параметрів нанорідини та їх залежності від температури. Автор обирає універсальний метод для знаходження температурної залежності цих параметрів, який можна використовувати для будь-якого нанорідинного теплоносія.

Проведені в розділі числові експерименти показали підвищення температурного режиму в теплоприймачі з нанорідиною у порівнянні із класичним теплоносієм.

Третій розділ присвячено пошуку числового розв'язку розробленої 3D математичної моделі вже при реальних умовах функціонування параболоциліндричних станцій. Для цього автором запропонований метод, в якому враховується нерівномірний розподіл щільності сонячного потоку на поверхні теплоприймача, а також конвективні та радіаційні втрати з цієї поверхні.

Нерівномірний розподіл щільності сонячного потоку на поверхні теплоприймача знаходився шляхом апроксимації числових даних, отриманих методом Монте-Карло. Ці дані передавались в розроблений комп'ютерний алгоритм для регресивного аналізу та створення функції апроксимації.

Отримана функція підставлялась у вираз для граничних умов та використовувалась в подальшому моделюванні.

Крім нелінійної функції апроксимації для щільності концентрованого сонячного потоку, в граничні умови вводились доданки для врахування конвективних та радіаційних втрат. Для вибору залежності, в якій враховуються конвективні втрати з поверхні теплоприймача, автор детально описує особливості конвективного теплообміну навколо горизонтального циліндру, відокремлює режими обтікання та аналізує вплив вільної та вимученої конвекції. На основі такого аналізу пропонуються критеріальні співвідношення, які вводяться в розроблений числовий алгоритм. В залежності від швидкості вітру визначаються відповідні коефіцієнти тепловіддачі за рахунок вимушеної або вільної конвекції. В якості розрахункового обирається більший з цих коефіцієнтів.

Радіаційні втрати з поверхні теплоприймача розраховуються за законом Стефана – Больцмана і також вводяться в числовий алгоритм. В даному розділі презентовано детальну блок-схему побудованого числового алгоритму.

На основі власного програмного Python-додатку проводиться комп'ютерне моделювання, результати якого свідчать про те, що додавання наночастинок у базовий теплоносій інтенсифікує теплообмін у теплоприймачі параболоциліндричної станції і це призводить до підвищення її теплової ефективності.

Важливим елементом дослідження є верифікація отриманих числових результатів шляхом порівняння із даними натурного експерименту з чистою силіконовою олією.

Четвертий розділ присвячено термодинамічній оптимізації теплоприймача параболоциліндричної станції із нанорідинним теплоносієм. Важливим є знаходження залежності чисел Нуссельта, які характеризують теплофізичні показники нанорідинного теплоносія, від чисел Рейнольдса, які характеризують його гідродинамічні показники. Визначено, що збільшення чисел Рейнольдса призводить до підвищення значень чисел Нуссельта для нанорідини, і це свідчить про інтенсифікацію конвективного теплообміну в теплоприймачі. В той же час при підвищенні швидкості теплоносія зростають гідродинамічні втрати в системі. Наявність подібних суттєвих втрат автор доводить, базуючись на даних гідродинамічного аналізу нанорідинного теплоносія. Ці втрати можуть повністю компенсувати позитивний енергетичний ефект від використання нанорідин. Тому виникає необхідність в проведенні термодинамічної оптимізації системи із нанорідинним теплоносієм.

Така термодинамічна оптимізація проводилась в роботі методами нерівноважної термодинаміки. В розділі детально описані теоретичні основи цих методів, наведені співвідношення, на яких базується ентропійний аналіз процесу конвективного теплообміну в нанорідинному теплоносії. На основі проведеного ентропійного аналізу були визначені числа Рейнольдса для нанорідинного теплоносія сонячної параболоциліндричної станції, які

забезпечують максимальні значення теплової ефективності системи прийму при мінімальних значеннях гідравлічних втрат.

В роботі отримано ряд нових наукових результатів, а саме:

1. **Вперше** на основі класичної системи рівнянь Нав'є-Стокса розроблена 3D нелінійна математична модель, створений числовий алгоритм та відповідний **власний програмний продукт** для визначення особливостей теплообміну в теплоприймачі параболоциліндричної станції з нанорідиною в якості теплоносія.
2. **Вперше** на основі числових експериментів доведено, що додавання наночастинок оксиду алюмінію до базового теплоносія (термічної олії) параболоциліндричної станції призводить до інтенсифікації теплообміну в теплоприймачі, що підвищує загальну теплову ефективність системи.
3. **Вперше** визначені якісні та кількісні показники, які показують суттєве збільшення втрат тиску в теплоприймачі з нанорідиною в порівнянні із чистою термічною олією. Знайдена залежність чисел Нуссельта від чисел Рейнольдса для нанорідини та доведена необхідність проведення термодинамічної оптимізації системи.
4. **Вперше**, базуючись на принципах нерівноважної термодинаміки, проведений ентропійний аналіз та визначені оптимальні значення чисел Рейнольдса, які забезпечують максимальну теплову ефективність при мінімальних гідродинамічних втратах.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. На основі розробленого числового алгоритму, що базується на методі контрольних об'ємів, був створений власний програмний код, який має узагальнений характер і, в разі незначної корекції, може застосовуватися для розрахунку течії в круглих каналах з нанорідиною, які є елементом будь-якого технологічного обладнання. Крім того, створений програмний код має гнучку та прозору структуру, що дозволяє без змін структури підлаштовувати його під будь-який тип теплоносія та будь-які умови функціонування системи.
2. Результати проведеного дослідження можуть бути використані під час проектування та функціонування сучасних сонячних термодинамічних установок різного температурного рівня та призначення, в яких в якості теплоносія використовуються нанорідини різного типу.
3. Теоретичні та практичні положення роботи стали складовою частиною навчальних дисциплін «Моделі і методи прикладної математики», «Методи ідентифікації параметрів математичних моделей», які викладаються для здобувачів вищої освіти рівня PhD спеціальності 113 Прикладна математика в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара.
4. Проведені дослідження та їх результати складають відповідний розділ ініціативної науково-дослідної роботи «Детерміновані та стохастичні алгоритми комп'ютерного моделювання об'єктів та процесів різної

природи» (2022 – 2024, науковий керівник проф. Книш Л.І., державний реєстраційний номер 0122U001467), яка проводиться на кафедрі комп'ютерних технологій факультету прикладної математики ДНУ.

В той же час, в роботі при загальній позитивній оцінці одержаних результатів, присутні деякі недоліки, а саме:

1. В науковій новизні та практичному значенню отриманих результатів роботі сказано «...створений числовий алгоритм та відповідний власний програмний продукт...». Але, нажаль, автор не приділив належної уваги опису власного програмного продукту (мова програмування, структура та ін.).
2. Автор для розв'язку дискретного аналогу вихідних рівнянь використовує розщеплення по радіальній та кутовій координатах. Але як впливає похибка факторизації на одержані результати в роботі не згадується.
3. Отримані автором результати для ламінарного (рис. 2.4) та турбулентного (рис. 3.4) режиму течії важко порівняти в силу різного діапазону довжини каналу (10-20 м для ламінарного, 20-50 м для турбулентного).
4. У дисертації відсутні відомості щодо обчислювальних витрат, зокрема, інформація про тип процесора, час виконання одного розрахунку, обсяг пам'яті та використання розпаралелювання.
5. Не розкритий фізичний зміст механізму суттєвого підвищення температури нанорідинного теплоносія у порівнянні із чистим теплоносієм (с.5, с.72).
6. При розгляді гідродинаміки і теплообміну для течій нанорідин в круглій трубі теплоносії є гетерогенним і складається з рідкої і твердої фракції. Рівняння, що описують гідродинаміку записані для гомогенного теплоносія. Незрозуміло як враховується залежність теплофізичних властивостей нанорідини, таких як в'язкість, теплопровідність, густина від концентрації і розмірів наночастинок та інших факторів.

Висновок опонента ґрунтується на тому, що наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертації Борисенка Андрія Геннадійовича. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв'язана актуальна науково-технічна задача, що полягає у підвищенні теплової ефективності сонячних параболоциліндричних станцій за рахунок використання нанорідинних теплоносіїв в системі прийому. Отримані результати можуть знайти широке практичне застосування не тільки в сонячних термодинамічних системах, а і будь-яких енергетичних системах з перспективними нанорідинними теплоносіями. Це вказує на велике теоретичне та практичне значення сформульованих в дисертації наукових положень, висновків та рекомендацій.

Всі ці наукові здобутки в повній мірі висвітлені в публікаціях Борисенка А.Г., а саме в 3-х статтях (2 статті в фахових виданнях України категорії Б та 1 стаття в міжнародному виданні, яке входить до наукометричної бази Scopus з квартилем Q3) та в 6-ти тезах міжнародних наукових конференцій, в яких автор брав участь для апробації результатів своїх досліджень

Вважаю, що отримані в дисертації наукові результати є достовірними, що підтверджується їх верифікацією на кожному етапі дослідження. Всі вимоги щодо академічної доброчесності виконані. Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до наукових текстів та публікацій.

Дисертація Борисенка А.Г. «Математичне та комп'ютерне моделювання теплообміну в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій» за напрямком досліджень та змістом повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика, галузі знань 11 Математика та статистика.

За науковим рівнем, науковою новизною отриманих результатів, їх теоретичною та практичною значимістю та обсягом виконаних досліджень, дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам відповідно наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. зі змінами від 21.03.2022), а її автор Борисенко Андрій Геннадійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент

доцент кафедри загальноосвітніх гуманітарних та природничих дисциплін, секція вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету, к.т.н., доц.

Світлана МОІСЕЄНКО

Підпис Світлани МОІСЕЄНКО

засвідчую

Начальник відділу кадрів

Іонова Л.С.

