

РЕЦЕНЗІЯ

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

Дисертаційна робота Борисенка Андрія Геннадійовича «Математичне та комп'ютерне моделювання теплообміну в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій» присвячена розробці моделей, методів та алгоритмів для комп'ютерного моделювання процесу конвективного теплообміну в системах прийому тепла сонячних термодинамічних станцій з нанорідинним теплоносієм.

1. Актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами

Інтенсифікація конвективного теплообміну в сонячних термодинамічних станціях призводить до підвищення їх загальної енергетичної ефективності. Перспективним методом інтенсифікації конвекції є використання в якості теплоносія спеціальних нанорідин, які створюються шляхом додавання в базовий теплоносій наночастинок інших матеріалів. Таке додавання змінює теплофізичні властивості теплоносія, що призводить до підвищення його спроможності передавати тепло. В той же час додавання наночастинок збільшує гідродинамічні втрати під час прокачки теплоносія. Пошук оптимального співвідношення між теплофізичними та гідродинамічними параметрами на основі проведення математичного та комп'ютерного моделювання конвективного теплообміну в системах прийому сонячних термодинамічних станцій є актуальною науковою задачею, яка досліджувалась в ході дисертаційної роботи.

Тематика роботи повністю відповідає науковому напрямку кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара і знаходиться в рамках ініціативної наукової теми «Детерміновані та стохастичні алгоритми комп'ютерного моделювання об'єктів та процесів різної природи» (№ держреєстрації 0122U001467, 2022-2024 рр.) цієї кафедри.

2. Особистий внесок здобувача

Особистий внесок здобувача полягає в презентації етапів складання нелінійної 3D математичної моделі процесу конвективного теплообміну в системах прийому сонячних термодинамічних станцій із нанорідинним

теплоносієм; в описі методу апроксимації теплофізичних властивостей нанорідин; у створенні відповідного числового алгоритму та власного програмного застосунку, на основі якого проведені числові експерименти по визначенню температурних полів в нанорідині при граничних умовах першого та другого роду; в уточненні математичної моделі конвективного теплообміну, в якій враховуються реальні умови функціонування теплоприймача сонячної термодинамічної станції із нанорідинним теплоносієм; в описі методу розрахунку нерівномірного концентрованого теплового потоку, що поступає від концентратора на поверхню теплоприймача; в проведенні гідродинамічного аналізу руху нанорідинного теплоносія в теплоприймачі сонячної термодинамічної станції; в доведенні необхідності термодинамічної оптимізації системи прийому із нанорідиною; у виборі методу термодинамічної оптимізації системи, який базується на принципах нерівноважної термодинаміки; в описі етапів проведення ентропійного аналізу та відповідних критеріїв термодинамічної оптимізації; в знаходженні діапазону чисел Рейнольдса, при яких енергетична ефективність нанорідинного теплоносія буде найвища, а гідродинамічні втрати найменші.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, що отримані та розроблені автором, базуються на сучасних методах математичного та комп'ютерного моделювання, зокрема, математичному аналізу, рівняннях математичної фізики та теорії диференціальних рівнянь, методах обчислень та об'єктно-орієнтованого програмування.

4. Ступінь новизни результатів, їх теоретичне та практичне значення

В дисертаційній роботі набули подальшого розвитку теоретичні підходи та практичне застосування методів математичного та комп'ютерного моделювання процесів конвективного теплообміну в теплоприймачах термодинамічних сонячних станцій з нанорідиною.

Вперше:

- розроблена 3D математична модель конвективного теплообміну в теплоприймачі сонячної термодинамічної станції з нанорідиною;
- створений числовий алгоритм та власний програмний продукт для проведення числових експериментів в системах прийому параболоциліндричних станцій з нанорідинним теплоносієм;
- базуючись на принципах нерівноважної термодинаміки, проведений ентропійний аналіз та визначені оптимальні значення чисел Рейнольдса, які

забезпечують максимальну теплову ефективність систем прийому параболоциліндричної станції з нанорідинним теплоносієм при мінімальних гідродинамічних втратах теплоносія.

Дістали подальшого розвитку:

- метод контрольного об'єму для числового моделювання нелінійної 3D задачі про конвективний теплообмін у теплоприймачі з нанорідиною;
- метод розщеплення багатовимірної задачі на одновимірні.

Запропоновано:

- знаходження функції апроксимації на основі даних методу Монте-Карло для визначення нерівномірного теплового потоку від Сонця на поверхню теплоприймача;
- підхід до знаходження функцій апроксимації теплофізичних властивостей нанорідинного теплоносія;
- підхід до проведення гідравлічного аналізу теплоприймача з нанорідиною сонячної термодинамічної станції;
- інженерні співвідношення для проведення ентропійного аналізу в теплоприймачах сонячних термодинамічних станцій з нанорідинним теплоносієм.

Досліджено:

- вплив кількості розрахункових кроків на збіжність різницевої схеми під час розрахунку конвективного теплообміну в нанорідинному теплоносії;
- залежність між теплофізичними та гідродинамічними параметрами для нанорідинного теплоносія сонячних термодинамічних станцій.

5. Практичне значення отриманих результатів

Вважаю, що робота має велике практичне значення. Створене власне програмне забезпечення, яке базується на методі контрольних об'ємів та методі розщеплення, може бути використане для розрахунку конвективного теплообміну в різних нанорідинних теплоносіях, що дозволяє проводити порівняння їх енергетичних показників і здійснювати вибір типу наночастинок та їх концентрацій.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес та використовуються при виконанні курсових та дипломних робіт студентами кафедри комп'ютерних технологій факультету прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

6. Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації

Матеріали дисертації висвітлені в 3 наукових статтях, серед яких одна стаття опублікована у провідному міжнародному журналі, що входить до наукометричної бази Scopus (Q3), 2 статті опубліковані в наукових фахових виданнях України категорії Б. Зазначені публікації з достатньою повнотою розкривають основний зміст дисертаційної роботи.

Результати досліджень автора пройшли апробацію та дістали позитивну оцінку на 6 міжнародних науково-практичних конференціях.

7. Аналіз основного змісту роботи

У *вступі* висвітлено актуальність роботи, мету та задачі дослідження, об'єкт та предмет дослідження, методи та підходи, що використовувались під час дослідження, а також його результати.

У *першому розділі* висвітлені основні переваги термодинамічного способу перетворення енергії Сонця, показано ключову роль системи прийому тепла для ефективного функціонування сонячних термодинамічних систем, проаналізовані методи інтенсифікації конвективного теплообміну в системах прийому сонячних термодинамічних станцій, визначена фізична модель системи прийому та тип нанорідинного теплоносія для подальшого дослідження.

У *другому розділі* показані етапи проведення дослідження, створена 3D математичну модель конвективного теплообміну в системі прийому сонячної термодинамічної станції з нанорідиною з граничними умовами 1 та 2 роду, проведена апроксимація теплофізичних параметрів теплоносія та визначені вирази для його профілів швидкості, презентовані етапи розробки числового алгоритму для задачі про конвективний теплообмін в нанорідині, побудована блок-схема алгоритму, проведені числові експерименти для визначення впливу додавання наночастинок на енергетичні показники системи прийому, знайдено аналітичний розв'язок тестової задачі про конвективний теплообмін в круглому каналі при постійній температурі стінки, проведена верифікація розробленої математичної моделі та отриманих числових даних шляхом їх порівняння з аналітичними результатами для тестової задачі.

У *третьому розділі* проведено математичне та комп'ютерне моделювання конвективного теплообміну в теплоприймачі з нанорідиною при реальних умовах функціонування сонячної термодинамічної станції. В граничні умови на поверхні додалися вирази для нерівномірного теплового потоку на поверхні теплоприймача та вирази, в яких враховуються конвективні та радіаційні втрати з цієї поверхні. В ході комп'ютерного

моделювання доведено, що додавання наночастинок у базовий теплоносії призводить до інтенсифікації конвективного теплообміну в теплоприймачі.

Розроблена математична модель та отримані числові результати порівнювались з експериментальними даними. Порівняння показало задовільний збіг числових та експериментальних даних.

У *четвертому розділі* доведена необхідність в термодинамічній оптимізації системи. Для цього був зроблений гідравлічний аналіз течії нанорідини в теплоприймачі та відмічене значне зростання в ньому гідродинамічних втрат. Визначено взаємний вплив теплофізичних та гідродинамічних параметрів у нанорідині та проведена термодинамічна оптимізація системи, на основі якої знайдені числа Рейнольдса, що забезпечують максимальні теплові показники систем прийому з нанорідинним теплоносієм при мінімальних гідродинамічних втратах.

Робота завершується висновками, які впливають зі змісту роботи, є логічними та віддзеркалюють її основні результати.

8. Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення

Робота має традиційну структуру і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків.

Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Викладення матеріалу в дисертації є логічним і відповідає вимогам до наукових праць, а зміст роботи висвітлює основні результати наукових досліджень.

9. Зауваження щодо змісту дисертації

- В дисертації автор пропонує використовувати в якості нанорідини суспензію, що виготовлена на основі термічної олії Syltherm800 та наночастинок оксиду алюмінію Al_2O_3 . Такий вибір обумовлений наведеними в роботі перевагами силіконової термічної олії Syltherm800 як теплоносія і властивостями наночастинок оксиду алюмінію. В той же час не зрозуміло як ці речовини впливають одна на одну з точки зору хімічної активності, методу виготовлення суспензії, швидкості осідання частинок тощо.

- В другому розділі дисертації розроблена 3D математична модель, що описує конвективний теплообмін у теплоприймачі з нанорідною при граничних умовах другого роду – постійний тепловий потік на стінки. В той же час верифікація такої математичної моделі і отриманих на її основі числових результатах проводилась на основі аналітичного розв'язку, який отриманий при граничних умовах першого роду. Вважаю, що було б доречним

розроблену в розділі 2 математичну модель також розв'язувати з граничними умовами першого роду.

- Числові експерименти при реальних умовах функціонування станції проводились для параболоїдного концентратора відповідної геометрії. Саме для такого концентратора знаходилась функція апроксимації, що описує щільність концентрованого сонячного потоку на поверхні теплоприймача. Виникає питання, чи можна отриману безрозмірну функцію для щільності сонячного потоку використовувати при зміні геометричних параметрів концентратора?

Наведені зауваження та питання, що сформульовані вище, не знижують в цілому високої оцінки виконаної роботи.

10. Відповідність дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту

Дисертаційна робота Борисенка Андрія Геннадійовича «Математичне та комп'ютерне моделювання теплообміну в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій» повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

11. Загальні висновки

В цілому, дисертаційна робота Борисенка Андрія Геннадійовича є завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Отримані науково обґрунтовані теоретичні та числові результати утворюють нову ланку досліджень в галузі розробки та удосконалення:

- математичних моделей для опису процесів конвективного теплообміну в теплоприймачах з нанорідинним теплоносієм сонячних термодинамічних станцій;

- методу контрольних об'ємів та розщеплення для числового дослідження нелінійних 3D задач математичної фізики;

- числових алгоритмів для проведення комп'ютерного моделювання та розрахунку енергетичних потоків в системах прийому тепла з нанорідинним теплоносієм сонячних термодинамічних станцій.

Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також практичну цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Борисенка Андрія Геннадійовича «Математичне та комп'ютерне моделювання теплообміну в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика, 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.

Рецензент

доктор технічних наук, с.н.с.,
провідний науковий співробітник
науково-дослідного інституту
енергоефективних технологій в
матеріалознавстві Дніпровського
національного університету імені
Олеся Гончара



Лілія НАКАШИДЗЕ

Підпис Лілії НАКАШИДЗЕ
засвідчую:

Вчений секретар вченої ради
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент



Тетяна ХОДАНЕН