

ВІДГУК

офіційного опонента 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

Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами. Тема дисертації Борисенко А.Г. є актуальною як в науковому, так і в прикладному аспектах. Наукова актуальність дисертації визначається необхідністю розробки та удосконалення моделей та методів розрахунку процесів тепломасопереносу в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій. Розв'язання подібних задач дозволить підвищити рівень як фундаментальних, так і прикладних досліджень у галузі прикладної математики за відповідним напрямком.

У прикладному аспекті актуальність полягає в тому, що у роботі створено програмне забезпечення для розрахунку основних енергетичних параметрів системи прийому сонячних параболоциліндричних станцій з нанорідиною в якості теплоносія. Розрахунок параметрів теплообміну в системах прийому сонячних параболоциліндричних станцій з нанорідиною дозволяє швидко визначити такі їх технічні рішення, які відповідають умовам енергоефективності, зменшення вартості, можливості практичної реалізації.

Дослідження проводились в рамках тематики ініціативної науково-дослідної роботи «Детерміновані та стохастичні алгоритми комп'ютерного моделювання об'єктів та процесів різної природи» (№ держреєстрації 0122U001467, 2022-2024 рр., науковий керівник проф. Книш Л.І.), що виконується на кафедрі комп'ютерних технологій у відповідності до тематичних планів науково-дослідних робіт Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота Борисенка А.Г. складається зі вступу, основного тексту, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 139 сторінок. Робота має 4 розділи основного тексту, містить 23 рисунки, 3 таблиці, список використаних джерел з 129 найменувань.

Обсяг та структура дисертації відповідають вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

У **вступі** автором обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і задачі досліджень, показано зв'язок роботи з науковими темами, викладені наукова новизна та практична значимість результатів досліджень, визначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** розглядаються перспективи використання спеціально створених рідин – нанорідин – для інтенсифікації конвективного теплообміну в системах прийому сонячних термодинамічних станцій, зокрема, параболоциліндричних.

На початку дослідження автор описує найбільш поширені типи термодинамічних систем перетворення сонячного випромінювання. На прикладі параболоциліндричних станцій визначає їх основні елементи, акцентуючи при цьому увагу на ключовій ролі системи прийому сонячного випромінювання при визначенні ефективності та вартості перетворення. В якості фізичної моделі обирається система прийому параболоциліндричної станції, яка складається із параболоциліндричного концентратора та трубчатого теплоприймача, який розташований на фокусній лінії концентратора. Проводиться аналіз можливих методів підвищення теплової ефективності системи прийому, на основі якого робиться висновок про широкі перспективи, які відкриваються у зв'язку із використанням сучасних нанотехнологій, а саме нанорідин в якості теплоносіїв.

Автор дає визначення нанорідини, як спеціальної суспензії, що готується шляхом додавання в базовий теплоносій частинок різних матеріалів нанометрового розміру. Проводиться типізація нанорідинних теплоносіїв, аналізуються сучасні методи їх дослідження та обирається тип нанорідини, який є характерним для сонячних параболоциліндричних станцій.

У **другому розділі** представлено математичну модель та результати числових досліджень процесів тепломасопереносу в системах прийому з нанорідинним теплоносієм при граничних умовах першого та другого роду. Математична модель конвективного теплообміну в нанорідині будувалась на основі класичної системи рівнянь Нав'є – Стокса в припущенні тонкого шару. На першому етапі при створенні числового алгоритму розглядався лише ламінарний режим руху нанорідини. Такий спрощений підхід дозволив структурувати задачу, зробити її більш придатною для подальшого числового моделювання, аналізу та верифікації.

Числовий алгоритм будувався на основі методу контрольного об'єму із використанням процедури розщеплення за просторовими координатам. На даному етапі в алгоритм вводилась залежність теплофізичних властивостей нанорідини від температури. Така залежність визначалась на основі регресивного аналізу експериментальних даних для базової рідини із подальшим використанням напівемпіричних співвідношень. Отримані апроксимації вводились в числовий алгоритм в якості нелінійних коефіцієнтів.

На основі розробленого числового алгоритму створено програмний Python-додаток, який використовувався для отримання числових даних по розподілу температур в нанорідині при постійному тепловому потоці на стінці теплоприймача. Результати комп'ютерного моделювання показали підвищення

температури в нанорідині в порівнянні з чистим базовим теплоносієм, що свідчить про інтенсифікацію конвективного теплообміну.

Створена математична модель, числовий алгоритм та отримані дані комп'ютерного моделювання були верифіковані шляхом порівняння із даними тестової задачі, яка була розв'язана аналітично. В якості тестової обиралась задача про конвективний теплообмін в круглій трубі при постійній температурі стінки і середній по перетину швидкості теплоносія. При порівнянні числових та аналітичних даних отримано їх повний збіг, що свідчить про адекватність запропонованого підходу та можливість його подальшого розвитку.

У **третьому розділі** в розроблену математичну модель були додані ефекти, які пов'язані із реальними умовами функціонування сонячних параболоциліндричних станцій. Більшість з цих ефектів сконцентрована у суттєво нелінійних граничних умовах на поверхні теплоприймача. Ці умови описують нерівномірний концентрований сонячний потік, що поступає від концентратора, а також умови, що пов'язані із конвективними та радіаційними втратами.

Розподіл щільності концентрованого теплового потоку на поверхні теплоприймача, як правило, розраховується методом Монте-Карло. Це значно ускладнює задачу, робить її спряженою. В роботі автор запропонував оригінальний підхід, який передбачає апроксимацію даних, отриманих методом Монте-Карло. Така процедура значно спрощує розрахунок сонячного потоку, максимально наближаючи його значення до реальних. Отримана апроксимація була введена в розроблений числовий алгоритм разом із співвідношеннями, які враховують конвективні та радіаційні втрати з поверхні теплоприймача. Конвективні втрати розраховувались на основі класичних критеріальних співвідношень для горизонтального циліндру, а радіаційні втрати – на основі закону Стефана – Больцмана. В числовий алгоритм також додатково був введений турбулентний профіль швидкості для теплоносія. Розроблений числовий алгоритм, який відповідає математичній моделі із реальними умовами функціонування, було структуровано та презентовано у вигляді блок-схеми.

Проведене комп'ютерне моделювання показало значний приріст температури в нанорідинному теплоносії у порівнянні з чистим базовим теплоносієм. Це вказує на інтенсифікацію конвективного теплообміну в системі прийому, що додатково підтверджується отриманими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі.

Верифікація результатів комп'ютерного моделювання, які знайдені при реальних умовах функціонування параболоциліндричних станцій, проводилась шляхом порівняння із експериментальними даними. Незначне відхилення результатів свідчить про адекватність запропонованої моделі.

У **четвертому розділі** автор описує термодинамічну оптимізацію теплоприймача із нанорідиною. Необхідність проведення такої оптимізації доводиться на основі гідродинамічного аналізу течії нанорідинного теплоносія.

В ході такого аналізу виявилась значна втрата тиску в нанорідинному теплоносії у порівнянні із чистим базовим теплоносієм, що особливо помітно при збільшенні швидкості теплоносія.

Термодинамічна оптимізація проводилась на основі принципів нерівноважної термодинаміки. Знайдена залежність значення генерації ентропії від чисел Рейнольдса. Базуючись на такій залежності, визначено діапазон чисел Рейнольдса, при якому значення генерації ентропії буде мінімальний. Цей діапазон відповідає мінімальним гідродинамічним втратам і максимальній тепловій ефективності системи прийому сонячної термодинамічної станції із нанорідинним теплоносієм.

У **висновках** сформульовані основні результати дисертаційної роботи.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими і достовірними. Це забезпечується:

- послідовним дотриманням принципів системного підходу, завдяки якому у роботі шляхом попереднього аналізу проблеми сформульовано основні задачі дисертаційної роботи, спрямовані на розробку моделей та методів дослідження процесів конвективного теплообміну в теплоприймачах сонячних термодинамічних станцій із нанорідинним теплоносієм;
- кваліфікованим застосуванням автором дисертації наукового інструментарію, а саме, математичного та комп'ютерного моделювання із застосуванням сучасних числових методів, комплексного підходу до аналізу відповідних процесів, що мають місце в системах з нанорідинним теплоносієм.

Наведені у дисертації результати роботи теоретично обґрунтовані і виконані на високому науковому рівні. Висновки, сформульовані у дисертаційній роботі, містять нові наукові положення щодо процесів конвективного теплообміну в системах прийому термодинамічних сонячних станцій із нанорідинним теплоносієм. Запропоновані моделі, методи та програмні застосунки можуть бути покладені в основу проектування реальних систем з нанорідинним теплоносієм, використовуватись в інших галузях науки, техніки, освіти.

Наукова новизна результатів дисертації.

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 параболоциліндричних станцій з нанорідиною в якості теплоносія.

2. **Вперше** на основі числових експериментів доведено, що додавання наночастинок оксиду алюмінію до базового теплоносія (термічної олії) 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 у 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 одержаних результатів.

1. На основі розробленого числового алгоритму, що базується на методі контрольних об'ємів, 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 використовується 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 рр., науковий керівник проф. Книш Л.І., державний реєстраційний номер 0122U001467), яка проводиться на кафедрі комп'ютерних технологій факультету прикладної математики ДНУ.

Рекомендації щодо подальшого використання результатів дисертаційної роботи. Всебічний аналіз результатів дисертації продемонстрував їх важливість при виконанні фундаментальних науково-дослідних робіт та при проведенні досліджень відповідних систем. Тому результати дисертації корисні для наукових, академічних і галузевих організацій,

які досліджують закономірності перетворювання відновлювальних джерел енергії. Використання їх у навчальному процесі підвищить рівень підготовки студентів, буде корисним при написанні курсових та дипломних робіт.

Відповідність змісту дисертації встановленим вимогам. Зміст дисертації повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика. За структурою, обсягом і оформленням дисертація відповідає всім вимогам, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Обсяг, кількість і джерела публікацій відповідають діючим вимогам.

Повнота викладення результатів роботи в опублікованих працях. Основні результати дисертації з достатньою повнотою викладено в 9 публікаціях, з яких 1 стаття опублікована у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus (Q3), 2 статті опубліковано у фахових виданнях України категорії Б. Результати дисертаційних досліджень Борисенка А.Г. пройшли апробацію на 6 міжнародних науково-практичних конференціях.

Зауваження по дисертації та автореферату.

1. Відсутня інформація щодо похибки експериментальних даних.
2. На стор. 68 не вказано, що таке $E(0, \Theta, z)$.
3. Не вказується, як вибирався та обґрунтовувався коефіцієнт β_k в рівнянні (3.9). Також для більшого розуміння цього рівняння було б доцільно навести розрахункову схему з показом напрямку сонячних променів, відповідних кутів тощо.

Слід зазначити, що зроблені зауваження не впливають на науковий рівень дисертації, новизну та достовірність її результатів.

Висновок по дисертації.

Дисертаційна робота Борисенка Андрія Геннадійовича «Математичне та комп'ютерне моделювання теплообміну в нанорідинному теплоносії сонячних термодинамічних станцій» являє собою завершений виклад відповідного дослідження, в якому отримані нові результати щодо вирішення однієї з важливих задач в галузі прикладної математики – розробки та удосконаленні моделей і методів дослідження процесів конвективного теплообміну в системах прийому сонячних термодинамічних станцій із нанорідинним теплоносієм.

Дисертація є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати, що мають теоретичну та практичну цінність. Сформульовані наукові положення дисертації, висновки і рекомендації є достовірними та відповідають об'єктивній дійсності.

Здобувачем дотримані вимоги академічної доброчесності, дисертація відповідає вимогам чинного законодавства про авторське право, містить повну і достовірну інформацію про результати наукової діяльності, а також використані методики досліджень.

За напрямом обраних і вирішених питань дисертаційна робота 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

Доктор технічних наук, завідувач
кафедри аерокосмічної теплотехніки
Національного аерокосмічного уні-
верситету ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"



Павло ГАКАЛ

Особистий підпис Гакал П. Г.
засвідчую

Учений секретар

Національного аерокосмічного уні-
верситету ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
канд. техн. наук, доцент



Тетяна БОНДАРЄВА