

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу **Юркова Романа Сергійовича**  
**«Моделювання енергетичних потоків в теплових акумуляторах з**  
**фазовим переходом «тверде тіло – рідина»,**  
що подана на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 113 Прикладна математика

Дисертаційна робота Юркова Романа Сергійовича «Моделювання енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» присвячена розробці моделей, методів та алгоритмів для комп'ютерного моделювання процесу тепломасопереносу в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина».

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

Безперебійне функціонування сонячних термодинамічних систем напряму залежить від ефективності та якості системи теплового акумулювання. Теплові акумулятори з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» можуть забезпечити постійну температуру теплоносія для циклу перетворення, яка дорівнює температурі фазового переходу теплоакумуючого матеріалу. Але для цього необхідно визначити раціональні геометричні, теплофізичні та динамічні параметри пристрою. Найбільш адекватним методом розв'язання такої задачі є математичне та комп'ютерне моделювання взаємопов'язаних процесів фазового переходу в теплоакумуючому матеріалі та конвективного теплообміну в теплоносії. Таке моделювання можливо проводити лише на основі спряженої математичної моделі, в якій враховані все ефекти, що виникають в фазоперехідних теплових акумуляторах. Саме така модель, відповідний числовий алгоритми та комп'ютерна програма були розроблені в даній роботі, що робить її актуальною та своєчасною.

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., науковий керівник проф. Книш Л.І.) цієї кафедри.

### **2. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів**

Особистий внесок здобувача полягає в складанні спряженої 3D математичної моделі енергопереносу в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» типу «труба в трубі»; в описі методів, які використовувались для числового моделювання теплових та динамічних процесів у фазоперехідних

теплових акумуляторів; у визначенні впливу вільної конвекції в розплаві на швидкість руху границі розподілу фаз та зміни значення цієї швидкості в залежності від режиму течії теплоносія; в обґрунтуванні необхідності проведення термодинамічної оптимізації фазоперехідних теплових акумуляторів типу «труба в трубі»; в проведенні ентропійного аналізу фазоперехідного теплового акумулятора відповідної геометрії; в розрахунку значення ентропії, яка генерується за рахунок теплових та гідродинамічних процесів; у визначенні діапазону чисел Рейнольдса, які забезпечують найвищі значення теплової ефективності фазоперехідного теплового акумулятора; в проведенні верифікації отриманих числових даних.

Результати розрахункових та теоретичних досліджень, які виносяться на захист, отримані автором самостійно.

### **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 та дискретної математики, зокрема, математичному аналізі, 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 переносу енергетичних потоків у теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина».

*Вперше:*

- розроблена 3D математична модель спряженої задачі Стефана для визначення особливостей теплообміну в тепловому акумуляторі з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» типу «труба в трубі»;
- створений числовий алгоритм та власний програмний продукт для проведення числових експериментів у фазоперехідних теплових акумуляторах;
- базуючись на принципах нерівноважної термодинаміки, проведений ентропійний аналіз та визначені оптимальні значення чисел Рейнольдса, які забезпечують максимальну теплову ефективність фазоперехідного теплового акумулятора при мінімальних гідродинамічних втратах теплоносія.

*Дістали подальшого розвитку:*

- метод уявленої теплоємності для числового моделювання багатовимірної задачі Стефана в циліндричних координатах;



- метод контрольного об'єму для числового моделювання спряженої задачі Стефана в циліндричних координатах;
- метод розщеплення багатовимірної спряженої задачі на одновимірні.

*Запропоновано:*

- функції апроксимації теплофізичних властивостей теплоносія;
- метод врахування вільної конвекції в розплаві теплоакumuлюючого матеріалу для теплового акумулятора типу «труба в трубі»;
- методи вирівнювання розподілу температур в теплоакumuлюючому матеріалі, що базуються на варіаціях швидкості теплоносія в просторі та часі.

*Досліджено:*

- вплив кількості розрахункових кроків на збіжність розрахункової схеми та на можливість врахування прихованої теплоти фазового переходу;
- вплив режиму течії теплоносія на інтенсивність вільної конвекції в розплаві;
- залежність між теплофізичними та гідродинамічними параметрами фазоперехідного теплового акумулятора.

## **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 теплових акумуляторів фазового переходу «тверде тіло – рідина» різної геометрії, що дозволяє проводити порівняння їх енергетичних показників і здійснювати вибір оптимального дизайну.

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 2 статті опублікована у наукових виданнях, що входить до наукометричної бази Scopus, 1 стаття опублікована в науковому фаховому виданні України категорії Б. Зазначені публікації з достатньою повнотою розкривають основний зміст дисертаційної роботи.

Результати досліджень автора пройшли апробацію та дістали позитивну оцінку на 5 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* показана ключову роль системи акумулювання теплоти для ефективного функціонування сонячних термодинамічних систем, висвітлені основні переваги теплового акумулювання з використанням теплоти фазового переходу «тверде тіло – рідина», проаналізовані методи інтенсифікації теплообміну в фазоперехідних теплових акумуляторах, визначена фізична модель для подальшого дослідження.

У *другому розділі* показано етапи створення спряженої математичної моделі процесу тепломасопереносу в тепловому акумуляторі з фазовим переходом «тверде тіло – рідина», обраний метод врахування впливу вільної конвекції в розплаві теплоакумуючого матеріалу, проведена апроксимація теплофізичних параметрів теплоносія та визначені вирази для його профілів швидкості.

У *третьому розділі* презентовані етапи розробки числового алгоритму спряженої задачі тепломасопереносу в тепловому акумуляторі, побудована блок-схема алгоритму, обґрунтовано вибір кількості вузлів розрахункової сітки, наведені типові розподіли температур у теплоносії та в теплоакумуючому матеріалі, проаналізовано вплив вільної конвекції в розплаві на енергетичні показники теплового акумулятора.

У *четвертому розділі* досліджені теплофізичні та гідродинамічні параметри фазоперехідних теплових акумуляторів, визначено взаємний вплив цих параметрів та проведена термодинамічна оптимізація системи, на основі якої знайдені числа Рейнольдса, що забезпечують максимальні теплові показники фазоперехідного теплового акумулятора при мінімальних гідродинамічних втратах.

У *п'ятому розділі* проведена верифікація результатів комп'ютерного моделювання шляхом порівняння із результатами експериментальних досліджень та аналітичними даними для тестових задач. Порівняння результатів показало їх задовільний збіг.

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, п'ятих розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку.

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



## **9. Зауваження щодо змісту дисертації**

- В роботі досліджуються раціональні геометричні, теплофізичні та гідродинамічні показники теплового акумулятора з фазовим переходом «тверде тіло – рідина». Автор вказує, що такий тепловий акумулятор має більш високі енергетичні показники у порівнянні з теплоємним тепловим акумулятором. В той же час загальні енергетичні показники запропонованого фазоперехідного теплового акумулятора в роботі не наведені. Важливо було б доцільним також дослідити енергетичний баланс пристрою, а саме, скільки енергії запасасться за рахунок теплоємності, а скільки за рахунок фазового переходу.

- Розрахунок вільної конвекції в розплаві теплоакumuлюючого матеріалу проводився з використанням критеріального рівняння для нітрату натрію, яке отримане в ході експериментальних досліджень розплаву саме цієї солі. Вважаю, що було б доречним ввести в комп'ютерний алгоритм більш універсальне критеріальне співвідношення для вільної конвекції в міжтрубному вертикальному просторі, яке підходить для будь-якої рідини.

- В роботі проведений параметричний аналіз по визначенню раціональних геометричних, теплофізичних та гідродинамічних показників фазоперехідного теплового акумулятора «тверде тіло – рідина» типу «труба в трубі». Автор наводить діапазон чисел Рейнольдса для теплоносія, якій відповідає його максимальним теплофізичним характеристикам. В той же час значення геометричних параметрів теплового акумулятора проаналізовано недостатньо повно. Зокрема, залишається відкритим питання, яка саме товщина, а відтак і маса, обраного теплоакumuлюючого матеріалу забезпечує оптимальні термодинамічні показники теплоносія.

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

Дисертаційна робота Юркова Р. С. «Моделювання енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

## **11. Загальні висновки**

В цілому, дисертаційна робота Юркова Романа Сергійовича 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 переносу енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина»;
- методу контрольних об'ємів та розщеплення для числового дослідження спряжених нелінійних 3D задач математичної фізики;

- числових алгоритмів для проведення комп'ютерного моделювання та розрахунку енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» типу «труба в трубі» .

Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також практичну цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Юркова Романа Сергійовича «Моделювання енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина», 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 Юрков Роман Сергійович 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  
Олеса Гончара



Лілія НАКАШИДЗЕ

Підпис Лілії НАКАШИДЗЕ  
засвідчую:

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



Тетяна ХОДАНЕН