

## ВІДГУК

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

Проблема акумулювання теплової та електричної енергії є пріоритетним напрямком розвитку сучасної науки. Ця проблема гостро стоїть під час використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергії. При термодинамічному перетворенні сонячної енергії проблему її акумулювання можна вирішувати шляхом застосування теплових акумуляторів з фазовим переходом «тверде тіло – рідина». Такі акумулятори мають суттєві переваги перед іншими методами зберігання тепла. Серед цих переваг висока енергетична ефективність за рахунок додаткової теплоти фазового переходу, екологічна безпека, відсутність елементів, що рухаються, зворотність циклів зарядки – розрядки, хімічна нейтральність більшості теплоакumuлюючих матеріалів тощо. Для реалізації всіх переваг такого типу акумулювання необхідно створити достатньо надійний математичний апарат для дослідження та розрахунку параметрів фазоперехідних теплових акумуляторів. Саме цьому присвячена робота Юркова Романа Сергійовича, яка є безумовно актуальною та своєчасною.

Представлена дисертація складається зі вступу та п'яти 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 акумулювання теплової енергії в сонячних енергетичних установках, визначаються переваги теплового акумулювання з використанням теплоти фазового переходу «тверде тіло – рідина». Автор показує місце фазоперехідного теплового акумулятора в загальній схемі сонячної параболоциліндричної станції та можливі проектні рішення такого теплоакumuлятора.

В розділі описується обрана фізична модель теплоакumuлятора та загальний принцип його функціонування. Базуючись на сучасних наукових публікаціях в даній сфері, визначаються основні виклики, що виникають під час проектування таких пристроїв. Основним недоліком вважається низький коефіцієнт теплопровідності існуючих теплоакumuлюючих матеріалів. В розділі описані методи підвищення цього коефіцієнту, для реалізації яких



необхідно проводити комп'ютерне моделювання теплообмінних процесів у фазоперехідного теплоаккумулятора типу «труба в трубі». Автор провів глибокий аналіз відповідних наукових публікацій в цьому напрямку та визначив основні задачі, які розв'язані під час проведення дисертаційного дослідження.

Другий розділ цілком присвячено побудові спряженої математичної моделі процесів теплопереносу в тепловому аккумуляторі з фазовим переходом «тверде тіло – рідина». Процеси фазового переходу та конвективного теплообміну, що мають місце в такому пристрої, є взаємопов'язаними. Тому для їх моделювання автор запропонував спряжену математичну модель, яка включає рівняння енергії для теплоносія та рівняння теплопровідності для теплоакуючого матеріалу. В якості умови спряженості обирались умови ідеального теплового контакту на границі «теплоносій – теплоакуючий матеріал».

Фазовий перехід моделювався за основі метода уявленої теплоємності, який дозволяє перейти від задачі Стефана із розривом параметрів до неперервної задачі теплопровідності для багаточасткового тіла. При моделюванні конвективного теплообміну враховувався режим течії теплоносія та залежність його теплофізичних властивостей від температури. В математичній моделі також враховано вплив вільної конвекції в розплаві теплоакуючого матеріалу. Це врахування здійснювалось шляхом введення в умови ідеального теплового контакту додаткового доданку, що містить змінне значення коефіцієнту тепловіддачі за рахунок вільної конвекції в розплаві теплоакуючого матеріалу.

Третій розділ присвячено комп'ютерному моделюванню теплообмінних процесів у фазоперехідному теплоаккумуляторі. Автор наводить етапи створення числового алгоритму, описує процедуру розщеплення по фізичним процесам та просторовим координатам, презентує відповідну блок-схему. На основі розробленого числового алгоритму проведено комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплоакуючому матеріалі та теплоносії в радіальному та поперечному напрямках, а також визначені середньомасові значення цих температур. Крім того, окремо досліджувався вплив вільної конвекції в розплаві на загальний теплообмін в тепловому аккумуляторі. З'ясовано, що вільна конвекція в розплаві відіграє значну роль лише при ламінарному режимі течії теплоносія і цей факт необхідно враховувати під час вибору динамічних характеристик теплоносія.

Четвертий розділ присвячено параметричному аналізу процесів теплообміну в тепловому аккумуляторі та його термодинамічної оптимізації. Автор дослідив вплив початкової температури теплоносія та його швидкості на інтенсивність процесу фазового переходу та конвективного теплообміну. Особливої уваги заслуговують дослідження, що пов'язані із варіаціями



швидкості теплоносія для вирівнювання розподілу температур в теплоакumuлюючому матеріалі. Крім того, такі варіації швидкості забезпечують відповідну температуру теплоносія на виході із каналу, що гарантує стабільну роботи всієї системи перетворення.

Завдяки тому, що фазоперехідні теплові акумулятори сонячних термодинамічних станцій мають велику довжину, важливим елементом дослідження можна вважати проведення їх термодинамічної оптимізації. В роботі описана методологія такої термодинамічної оптимізації та проведений ентропійний аналіз, який дозволив виявити діапазон чисел Рейнольдса для теплоносія, при якому енергетичні показники теплового акумулятора будуть максимальними.

У п'ятому розділ представлені етапи верифікації розробленої математичної моделі та отриманих числових результатів. При порівнянні цих результатів із експериментальними даними отриманий задовільний збіг, який охарактеризований кількісно. Крім того, додатково результати комп'ютерного моделювання порівнювались із аналітичними даними, які отримані при розв'язанні тестових задач. В якості тестових були обрані класична задача Стефана для теплоакumuлюючого матеріалу та задача Гретца – Нуссельта для теплоносія. Проведено порівняння показало майже повний збіг результатів, що доводить адекватність запропонованого підходу.

В роботі отримано ряд нових наукових результатів, а саме:

**1. Вперше** розроблена 3D математична модель спряженої задачі Стефана, створений відповідний числовий алгоритм та **власний програмний продукт** для визначення особливостей теплообміну в тепловому акумуляторі з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» типу «труба в трубі».

**2. Вперше** розроблено метод врахування вільної конвекції в розплаві теплоакumuлюючого матеріалу для теплового акумулятора типу «труба в трубі», визначено вплив режиму течії теплоносія на інтенсивність вільної конвекції в розплаві.

**3. Вперше** запропоновані методи вирівнювання розподілу температур у теплоакumuлюючому матеріалі, що базуються на варіаціях швидкості теплоносія в просторі та часі.

**4. Вперше**, 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.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. На основі розробленого числового алгоритми, що базується на методі контрольних об'ємів, був створений власний програмний код, який має узагальнений характер і, в разі незначної корекції, може застосовуватися для фазоперехідних теплових акумуляторів типу «труба в трубі» різного температурного режиму та призначення. Крім того, створений програмний код має гнучку та прозору структуру, що дозволяє без змін структури підлаштовувати його під будь-який тип теплоакumuлюючого матеріалу і 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 технологічного обладнання використовується фазоперехідний тепловий акумулятор «тверде тіло – рідина».

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 у 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.

Загалом позитивно оцінюючи одержані в роботі результати та зроблені дисертантом висновки, вважаю за необхідне висловити такі зауваження:

1. В роботі наведено вкрай мало інформації щодо розробленого автором чисельного алгоритму розв'язку спряженої задачі Стефана в циліндричному елементі фазоперехідного теплоакumuлятора типу «труба в трубі». Наведено лише словесний опис та надана загальна блок-схема чисельного алгоритму. Також відсутній опис програмної реалізації чисельного алгоритму.

2. Твердження «...Тому єдиним методом розрахунку подібних задач є числовий метод з подальшим аналізом, тестуванням та верифікацією отриманих результатів.» с. (56), не є коректним, адже існує ряд інших методів.

3. Автор використовує процедуру розщеплення за фізичними процесами та просторовими координатами (стор. 76). Однак, як впливають похибки розщеплення за фізичними процесами та просторовими координатами не досліджувалось автором ні теоретично ні чисельно.



4. В роботі відсутня інформація щодо порядку апроксимації вихідних рівнянь.

5. Обираючи метод уявної теплоємності в якості основного метода дослідження (с.59), непогано було б зазначити які недоліки має цей метод і як вони нівелюються при його застосуванні.

6. У роботі спостерігається непослідовність викладення матеріалу в деяких розділах. Зокрема, на стор. 57, 61, 62, 63 другого розділу наведено огляд літературних джерел, який логічніше було б розмістити в першому (оглядовому) розділі.

Висновок опонента ґрунтується на тому, що наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертації Юркова Романа Сергійовича. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв'язана актуальна науково-технічна задача, що полягає у підвищенні енергетичної ефективності теплових акумуляторів з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» за рахунок вибору його раціональних геометричних, динамічних та теплофізичних параметрів. Отримані результати можуть знайти широке практичне застосування не тільки в сонячних термодинамічних системах, а і в будь-яких енергетичних системах з перспективними фазоперехідними тепловими акумуляторами «тверде тіло – рідина». 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 Юркова Р.С., а саме в 3-х статтях (1 стаття в фаховому виданні України категорії Б та 2 статті в виданнях, які входять до наукометричної бази Scopus, причому одне з них має квартиль Q3) та в 5-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 Юркова Р.С. «Моделювання енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» 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 Юрков Роман Сергійович заслуговує присудження наукового 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.