

ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами. Тема дисертації Юркова Р.С. є актуальною як в науковому, так і в прикладному аспектах. Наукова актуальність дисертації визначається необхідністю розробки і удосконалення моделей та методів розрахунку процесів тепломасопереносу в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина». 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 у теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина», які побудовані за принципом «труба в трубі». Розрахунок раціональних геометричних, теплофізичних та динамічних характеристик таких пристроїв дозволяє швидко визначити технічні рішення, які відповідають умовам енергоефективності, зменшення вартості, можливості практичної реалізації.

Дисертація виконана 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.), яка 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 Юркова Р.С. складається зі вступу, основного тексту, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 142 сторінки. Робота має 5 розділів основного тексту, містить 39 рисунків, 2 таблиці та список використаних джерел з 119 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 та 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 теплоти фазового переходу «тверде тіло – рідина» в теплових акумуляторах різних типів,

зокрема, для акумуляції енергії Сонця в термодинамічних сонячних енергетичних установках. Для цього автором проведена класифікація методів акумулювання енергії в сонячних енергетичних установках. Класифікація виконувалася з урахуванням фізичного принципу перетворення енергії Сонця в електричну енергію – термодинамічного або фотоелектричного принципів.

В розділі детальна розглянута загальна схема сонячної параболоциліндричної станції та визначено місце системи акумулювання теплової енергії в контурі циркуляції теплоносія такої станції. Проведена типізація методів акумулювання теплоти в параболоциліндричних станціях та сформульовані основні переваги та недоліки теплового акумулювання на основі фазового переходу «тверде тіло – рідина».

Проведений аналіз літературних джерел дозволив визначити основні засоби, що покращують тепломасоперенос у фазоперехідних теплових акумуляторах. Але, при цьому слід враховувати, що їх реалізація можлива лише на основі всебічного дослідження взаємопов'язаних процесів фазового переходу для теплоакумуючого матеріалу (ТАМу) та конвективного теплообміну для теплоносія, що обумовлює розробку відповідної спряженої математичної моделі, яку запропонував автор.

Етапи розробки 3D спряженої математичної моделі представлені у **другому розділі**. Ключовим моментом при розробці відповідної математичної моделі є вибір методу розв'язання задачі Стефана для ТАМу. Під час моделювання задачі Стефана виникає багато проблем, пов'язаних із розривним характером зміни теплофізичних параметрів на границі фазового переходу. Для подолання цієї проблеми автор пропонує використовувати метод уявленої теплоємності, який базується на уявному переході від двох шарів з рідкою та твердою фазами ТАМу до трьох шарів. Тобто вважається, що границя нескінченно малої товщини, де виділяється або поглинається теплота фазового переходу, розширюється до перехідного шару кінцевих розмірів. Математично це дозволяє перейти від двох рівнянь теплопровідності для твердої та рідкої фаз зі спеціальною умовою на границі переходу до одного рівняння теплопровідності для багатшарового тіла, що значно спрощує моделювання та числову реалізацію.

Рівняння конвективного теплообміну в теплоносії будувалось на основі класичної системи рівнянь Нав'є – Стокса в припущенні тонкого шару. Вважалось, що теплофізичні властивості теплоносія залежать від температури. Крім того, розглядався як ламінарний, так і турбулентний профіль його швидкості.

Спряженість теплових потоків на границі теплоносій – ТАМ моделювалась за допомогою граничних умов 4 роду – умов ідеального теплового контакту.

Окремим важливим елементом дослідження можна вважати запропонований метод врахування вільної конвекції в розплаві ТАМу. Автор пропонує розраховувати тепловий потік, який обумовлений конвекцією, на

основі критеріальних рівнянь. Але, в той же час, в цих рівняннях враховується змінна товщини шару розплаву, що дозволяє більш детально визначити особливості протікання процесу. Крім того, визначена залежність інтенсивності вільної конвекції в розплаві ТАМу від режиму течії теплоносія та, відповідно, її вплив на швидкість руху границі розподілу фаз.

У **третьому розділі** детально описані етапи створення комп'ютерного алгоритму для визначення основних параметрів теплового акумулятора з фазовим переходом типу «труба в трубі». Алгоритм будувався на основі методу контрольного об'єму із розщепленням багатовимірної задачі за просторовими координатами та фізичними процесами. Структура розробленого числового алгоритму описана та представлена у відповідній блок-схемі, на основі якої автором створений власний Python-застосунок.

В розділі представлені результати розрахунку типових розподілів температур в ТАМі та теплоносії, середньомасових значень температур ТАМу та теплоносія, візуалізовано вплив вільної конвекції в розплаві на теплообмін в ТАМі.

У **четвертому розділі** проведений параметричний аналіз та визначено вплив на тепломасообмін у фазоперехідних теплових акумуляторах типу «треба в трубі» температури теплоносія на вході в канал та швидкості теплоносія. Автор для вирівнювання фронту границі розподілу фаз та оптимізації геометричних розмірів теплового акумулятора пропонує застосовувати керування швидкістю теплоносія. Можливість такого підходу доведена їм на основі проведених числових експериментів. Пропонується змінювати швидкість теплоносія в просторі або в часі, але більш доречним і технічно більш простішим вважається керування швидкістю теплоносія в часі.

Відомо, що фазоперехідні теплові акумулятори типу «труба в трубі» параболоциліндричних станцій мають значну довжину (більш ніж 100 м). В такому випадку при їх використанні виникає додаткова проблема, яка пов'язана із вибором гідродинамічних параметрів теплоносія, бо витрати насосу на прокачку можуть перевищувати усі позитивні енергетичні ефекти. Тому виникає окрема задача, яка пов'язана із термодинамічною оптимізацією фазоперехідного теплового акумулятора великої довжини. Така оптимізація була проведена в роботі, базуючись на принципах нерівноважної термодинаміки. Автор провів ентропійний аналіз та визначив значення генерації ентропії, базуючись на інженерному підході. Це дозволило знайти діапазон чисел Рейнольдса, при яких енергетична ефективність теплового акумулятора буде максимальною, а гідродинамічні втрати мінімальними.

У **п'ятому розділі** докладно описано оцінку адекватності запропонованого підходу, яка складалась із трьох етапів. На першому етапі оцінки проводилося порівняння отриманих результатів із результатами натурного експерименту. Кількісні критеріїв розраховувались на основі класичних методів статистичної обробки даних. Проведений аналіз показав задовільний збіг числових та

експериментальних даних, що свідчить про адекватність запропонованого підходу.

На другому та третьому етапах оцінка адекватності проводилась шляхом порівняння числових результатів із результатами тестових задач, які були розв'язані аналітично. Так, для ТАМу було розв'язана задача Стефана у класичній постановці із тривіальними граничними умовами першого роду. Порівняння показало майже повний збіг результатів. Невелике відхилення, як і очікувалося, спостерігалось лише в зоні фазового переходу. Але це не впливає на загальну картину та свідчить про адекватність обраного для розв'язання задачі Стефана методу уявленої теплоємності.

Для теплоносія була аналітично розв'язана тестова задача про конвективний теплообмін в круглій трубі при постійній температурі стінки. Порівняння показало повний збіг числових та аналітичних результатів, що свідчить про адекватність обраної моделі теплообміну для теплоносія.

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.

Наукові положення, висновки і рекомендації, які 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 тепломасопереносу в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина»;
- 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 у фазоперехідних системах теплового акумулювання.

Наведені у дисертації результати роботи теоретично обґрунтовані і виконані на високому науковому рівні. Висновки містять нові наукові положення щодо процесів тепломасопереносу в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина». Запропоновані моделі, методи та програмні застосунки можуть бути покладені в основу проектування реальних систем теплового акумулювання, використовуватись в інших галузях науки, техніки, освіти.

Наукова новизна результатів дисертації.

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 у розплаві теплоакумулюючого матеріалу для теплового акумулятора типу «труба в трубі», визначено вплив режиму теплоносія на інтенсивність вільної конвекції в розплаві.
3. **Вперше** запропоновані методи вирівнювання розподілу температур в теплоакумулюючому 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 одержаних результатів.

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 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 теплоакумулюючого 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 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.

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 в освітніх закладах 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 8 публікаціях, з яких 2 статті опубліковані у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 1 стаття опублікована у фаховому виданні України категорії Б. Результати дисертаційних досліджень Юркова Р.С. пройшли апробацію на 5 науково-практичних конференціях.

Зауваження по дисертації та автореферату.

1. Відсутня інформація щодо похибки експериментальних даних.
2. Теплофізичні властивості ТАМу в «mushy» зоні було б доцільно розраховувати з урахуванням відносної частки кожної з фаз.
3. Вказується, що теплофізичні властивості не залежать від температури, але в рівняннях це відображено (наприклад, рівняння (2.2.1) – (2.2.4)).

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

Висновок по дисертації.

Дисертаційна робота Юркова Романа Сергійовича «Моделювання енергетичних потоків в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» 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 та методів дослідження процесів тепломасопереносу в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина».

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 Юрков Роман Сергійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент

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



Павло ГАКАЛ

Особистий підпис Гакал П. Г.
засвідчую

Учений секретар

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



Тетяна БОНДАРЄВА