

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
галузі знань 11 – Математика та статистика

Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота є рукописом загальним обсягом 142 сторінки основного тексту, що містить 2 таблиці та 39 рисунків. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків за результатами досліджень і переліку використаних літературних джерел з 119 найменувань.

Дисертацію виконано в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара.

Актуальність теми

Останнім часом в світі спостерігається стала тенденція до розвитку та удосконаленню промислових та автономних систем теплового акумулювання. Викликом в цьому напрямку є удосконалення теплових акумуляторів для термодинамічних сонячних станцій.

В цьому сенсі робота Р. С. Юркова спрямована на розв'язання важливої науково-технічної задачі, яка пов'язана з таким удосконаленням, а саме пошуком раціональних геометричних, теплофізичних та динамічних параметрів теплового акумулятора з фазовим переходом «тверде тіло – рідина». Юрков Р.С. пропонує на основі математичного та комп'ютерного моделювання визначити основні параметри системи, провести термодинамічну оптимізацію фазоперехідного теплового акумулятора типу «труба в трубі», проаналізувати та запропонувати методи підвищення енергетичної ефективності фазоперехідних теплових акумуляторів.

Отже, обрана тема та напрямок наукових досліджень, пов'язаний із використанням енергоефективних технологій, повністю відповідають сучасним викликам розвитку суспільства та мають перспективи подальшого впровадження як в галузі відновлюваної енергетики, так і в інших енергетичних та промислових галузях України та світу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження проводилось у відповідності до планів наукових досліджень кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара 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 Книш Л.П.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків та їх достовірність

Наукові положення і висновки, наведені у дисертації, отримані автором шляхом математичного та комп'ютерного моделювання взаємопов'язаних процесів тепломасообміну в теплових акумуляторах з фазовим переходом «тверде тіло – рідина».

Достовірність результатів роботи забезпечено коректністю математичних постановок задач, використанням в роботі фундаментальних положень теорій тепломасообміну та гідродинаміки, загальноприйнятих сучасних методів математичного моделювання та перевіркою адекватності математичних моделей.

Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів для науки і практики

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі, яка пов'язана із забезпеченням безперебійного функціонування сонячних термодинамічних станцій шляхом використання фазоперехідних теплових акумуляторів типу «труба в трубі».

Нові наукові результати, які отримані автором, полягають в наступному:

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 теплоносія на інтенсивність вільної конвекції в розплаві.
3. Вперше запропоновані методи вирівнювання розподілу температур в 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.

Практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

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 підлаштовувати його без змін структури під будь-який тип теплоакумуючого 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 у якості технологічного обладнання використовується фазоперехідні теплові акумулятори «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

Особистий внесок здобувача полягає в розробці математичної моделі, числового алгоритму та програмного застосунку для моделювання спряженої задачі Стефана та конвективного теплообміну в тепловому акумуляторі із фазовим переходом «тверде тіло – рідина», а також проведенні розрахунково-теоретичних досліджень на їх основі.

Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах

Основні матеріали дисертації викладені у 8-ти друкованих працях, в тому числі: 3-х статтях, з яких 2 статті входять до наукометричної бази Scopus, а 1 стаття опублікована в фаховому журналі України категорії Б. Основні положення і результати роботи доповідались і обговорювались на 5-ти міжнародних наукових конференціях. Всі публікації містять результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень та відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Аналіз змісту дисертації

У вступі висвітлена актуальність дослідження, його мета та основні задачі. Автор визначив об'єкт та предмет дослідження, перелічив методи, які використовувались в роботі, сформулював її наукову новизну та практичну цінність.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних наукових публікацій за обраною темою. Для проведення такого аналізу і визначення траєкторії дослідження автор описує методи акумулювання енергії в сонячних енергетичних установках, зокрема в термодинамічних. В розділі наведені типи теплових акумуляторів сонячних параболоциліндричних станцій, представлені переваги та недоліки теплового

акумуляції з використанням теплоти фазового переходу «тверде тіло – рідина». Окрему увагу приділено аналізу методів інтенсифікації конвективного теплообміну в фазоперехідних теплових акумуляторах та огляду методів дослідження таких систем.

У другому розділі розроблена математична модель енергопереносу в одиничному елементі фазоперехідного теплового акумулятора типу «труба в трубі». Завдяки тому, що процеси плавлення–затвердіння в теплоакumuлюючому матеріалі та конвективного теплообміну в теплоносії взаємопов'язані, автор запропонував спряжену математичну модель, що вважаю дуже вдалим рішенням. Рівняння енергії для теплоакumuлюючого матеріалу будувалось на основі методу уявленої теплоємності, а рівняння енергії для теплоносія – на основі рівнянь Нав'є – Стокса в припущенні тонкого шару. В якості умов спряженості обирались умови ідеального теплового контакту спеціального виду. Саме в цих умовах автор пропонує враховувати вплив вільної конвекції і розраховувати її на основі критеріальних рівнянь.

У третьому розділі наведені етапи створення числового алгоритму і особливості його програмної реалізації. В розділі представлена блок-схема числового алгоритму, що полегшує аналіз його структури. Автор наводить типові розподіли температур в теплоакumuлюючому матеріалі та теплоносії, які отримані в результаті проведеного комп'ютерного моделювання. Особливу увагу приділено впливу вільної конвекції в розплаві на загальний теплообмін в тепловому акумуляторі. Визначено, що при ламінарному режимі теплоносія цей вплив є суттєвим. Вважаю, що такі висновки є важливими під час вибору динамічних режимів теплоносія.

В четвертому розділі проведений параметричний аналіз та термодинамічна оптимізація фазоперехідного теплового акумулятора типу «труба в трубі». Автор пропонує для вирівнювання товщини шару теплоакumuлюючого матеріалу та забезпечення постійної температури на виході з каналу варіювати швидкістю теплоносія в просторі та часі. Таке технічне рішення є доречним і таким, що відносно не складно здійснити. Важливим елементом дослідження є проведення термодинамічної оптимізації, яка полягає у виборі таких параметрів теплоносія, при яких його гідродинамічні втрати будуть мінімальні, а тепла ефективність максимально. Проведення термодинамічної оптимізації особливо актуально для теплових акумуляторів великої довжини (100 м та більше), в яких втрати тиску будуть значними. В розділі пропонується проводити термодинамічну оптимізацію, базуючись на принципах нерівноважної термодинаміки. Під час проведення ентропійного аналізу визначені діапазони чисел Рейнольдса теплоносія, які забезпечують максимальну енергетичну ефективність фазоперехідного теплового акумулятора типу «труба в трубі».

П'ятий розділ присвячено верифікації спряженої математичної моделі і отриманих числових результатів. Автор проводив верифікацію в три етапи. На першому етапі

порівнювались числові та експериментальні дані. На другому та третьому етапі верифікація проводилась шляхом порівняння із результатами тестових задач, які розв'язані аналітично. В якості тестових автор використовував класичну одновимірну задачу Стефана та задачу Гретца-Нуссельта про конвективний теплообмін в круглому каналі. На основі задачі Стефана тестувався числовий алгоритм для теплоакумуючого матеріалу, а на основі задачі Гретца – Нуссельта тестувався числовий алгоритм для теплоносія. Проведена верифікація в цілому показала добрий збіг результатів, що свідчить про адекватність запропонованого в роботі підходу.

У висновках перелічені основні етапи проведеного дослідження та його наукові та практичні результати.

Недоліки та зауваження по дисертаційній роботі

1. Спряжена математична модель математична модель теплообміну в фазоперехідному тепловому акумуляторі складається з нестационарного рівняння енергії для теплоакумуючого матеріалу та стаціонарного рівняння енергії для теплоносія. Виникає питання, як ці рівняння узгоджуються в часі?

2. При реалізації методу уявленої теплоємності при переході від класичної задачі Стефана із розривом параметрів до неперервної задачі теплопровідності для теплоакумуючого матеріалу необхідно визначити значення темпу кристалізації. Із яких міркувань обиралось це значення?

3. В роботі не наведені порівняння результатів комп'ютерного моделювання із дослідженими іншими авторів, що отримані подібними або іншими числовими методами.

4. Відомо, що для багатьох теплоакумуючих матеріалів характерним є зміна об'єму під час процесу фазового переходу. З тексту роботи не зрозуміло, чи враховувалась ця властивість під час проведення досліджень.

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

ВИСНОВОК ОПОНЕНТА

Представлена на рецензію дисертація Юркова Р.С. є завершеною науково-дослідною роботою, у якій на основі математичного та комп'ютерного моделювання вирішено важливу наукову задачу пошуку раціональних геометричних, теплофізичних та динамічних параметрів теплового акумулятора з фазовим переходом «тверде тіло – рідина» для забезпечення безперебійного функціонування сонячних термодинамічних станцій.

Сформульовані наукові положення дисертації, висновки і рекомендації є достовірними та відповідають об'єктивній дійсності. Основні досягнення висвітлені в фахових джерелах, визнаних МОН України. Матеріали дисертації у достатній мірі були представлені на міжнародних конференціях. Мова та стиль

дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

Здобувачем дотримані вимоги академічної доброчесності – дисертація не містить елементів плагіату та запозичень, має посилання на відповідні джерела інформації у випадку використання ідей, результатів та текстів інших авторів. Робота 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.

Рецензент

професор кафедри ракетно-космічних
та інноваційних технологій

Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,
д.-р. техн. наук, професор

Володимир ГАБРИНЕЦЬ

Габрінець Володимир

Підпис професора Володимира
Габрінця засвідчую

Вчений секретар вченої ради
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара,
канд. фіз.-мат. наук, доцент



Тетяна ХОДАНЕН