

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Захарова Дениса Віталійовича на тему «Математичне моделювання енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах»*, яку подано на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика

Пошук нових підходів до підвищення загальної ефективності перетворення енергії Сонця є важливою задачею сучасної науки. Великі перспективи в цьому напрямку має фотоелектричне перетворення сонячного випромінювання. Загальна ефективність промислових фотоелектричних систем є відносно низькою та напряму залежить від їх температурного режиму. Для більшості типів сонячних елементів характерним є суттєве падіння ефективності навіть при незначному підвищенні температур. Крім того, температурні коливання сприяють деградації сонячних елементів, що знижує ефективність фотоелектричних систем у довгостроковій перспективі. В представленій роботі методами математичного та комп'ютерного моделювання досліджується саме вплив температурних факторів на енергоперенос у сонячних фотоелектричних системах. Тому тема дисертаційного дослідження Дениса Віталійовича Захарова є безумовно актуальною та своєчасною.

Представлена дисертація складається зі вступу та п'ятих 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, визначаються переваги та недоліки фотоелектричного перетворення, порівнюються різні типи промислових та лабораторних сонячних елементів, визначаються методи підвищення їх енергетичної ефективності. Автор обирає методологію дослідження, яка базується на гіпотезі суцільності, та проводить огляд відповідних математичних моделей, які будувались в рамках такої гіпотези. На основі проведеного огляду обґрунтовано вибір двох типів математичних моделей для подальшого дослідження – стаціонарної 2D математичної моделі із розподіленими параметрами та нестаціонарної 1D математичної моделі із зосередженими параметрами.

Другий розділ цілком присвячено побудові стаціонарної 2D математичної моделі, в якій електрична складова враховується в нелінійному



джерельному члені. Залежність ККД сонячних елементів від температури, що вводилась в цей джерельний член, визначалась шляхом апроксимації експериментальних даних. Конвективні втрати з поверхні сонячної панелі розраховувались на основі класичних критеріальних рівнянь, а радіаційні втрати – за законом Стефана-Больцмана. Моделювання температурного режиму в сонячній панелі проводилось без розподілу її на шари, із використанням ефективних теплофізичних коефіцієнтів. Таке моделювання проводилось на основі розробленого ітераційного числового алгоритму та програмного додатку, який написано на мові програмування C++.

В ході числових експериментів визначено 2D розподіл температур в сонячній панелі, що дало змогу оцінити значення її середньої температури і середньої ефективності та порівняти їх зі значеннями, які надає виробник.

Третій розділ присвячено створенню математичної моделі та алгоритму розрахунку для нестационарної 1D моделі із зосередженими параметрами. На основі такої моделі визначено розподіл температур в кожному шарі сонячної панелі, при чому вважалось, що між шарами існує ідеальний тепловий контакт. Моделювання проводилось при постійних середньостатистичних значеннях щільності сонячного потоку, швидкості вітру, температурі навколишнього середовища, що є обмеженням даної моделі. В той же час, при проведенні дослідження враховувались всі кліматичні та географічні фактори в місці локації сонячної панелі, а саме, проводився перерахунок щільності сонячної радіації на похилу поверхню, розраховувались радіаційні та конвективні втрати, які з цим пов'язані. Залежність ККД сонячних елементів від температури визначалась на основі емпіричного співвідношення. Отримані числові дані дозволили проаналізувати вплив умов навколишнього середовища на температурний режим сонячної панелі та на її теплову інерційність.

У четвертому розділі проводиться удосконалення розробленої 1D моделі через врахування в ній реальних умов навколишнього середовища, які змінюються протягом обраного дня року. Передбачається, що такі дані будуть отримуватись зі всесвітніх кліматичних баз та оброблятись в програмного коді для подальшого використання під час моделювання. Автор наводить блок-схему розробленого програмного коду, який є інтерактивним, що підвищує його наукову та практичну значимість.

На основі розробленого коду проведено числове дослідження по визначенню температурного режиму в шарах сонячної панелі. Дослідження проводилось із архівними кліматичними даними, які відповідали даті проведення експериментальних досліджень. Це дозволило провести порівняння отриманих числових та експериментальних даних та довести їх задовільний збіг, що свідчить про адекватність запропонованого підходу.

У п'ятому розділі наведено результати моделювання розподілу температур в шарах комбінованої термофотоелектричної панелі. Автор



запропонував новий дизайн такої панелі, який передбачає шар теплоносія з фронтальної сторони сонячної панелі. В результаті моделювання, що проводилось на основі розробленої нестационарної 1D математичної моделі, було доведено, що наявність шару теплоносія не гарантує зниження температури сонячних елементів, а тільки сприяє їх температурній стабілізації. В той же час виявилось, що температурний режим теплоносія є достатнім для генерації низькопотенційної теплової енергії.

В роботі отримано ряд нових наукових результатів, а саме:

1. *Вперше* запропонований метод визначення середньоінтегральної температури сонячної панелі в реальних умовах її функціонування, який базується на розв'язанні стаціонарної нелінійної 2D математичній моделі енергопереносу. Знайдене значення дозволяє провести оцінку середньої ефективності сонячної панелі та порівняти її із значенням, що оголошено виробником.

2. *Вперше* на основі нестационарної нелінійної 1D математичної моделі *розроблено числовий алгоритм та власний інтерактивний програмний продукт* для визначення розподілу температур в шарах сонячної панелі. В розробленому за допомогою хмарних технологій комп'ютерному алгоритмі передбачається передача та обробка кліматичних даних в реальному часі з міста локації сонячної панелі.

3. *Вперше* запропоновано фізичну та відповідну математичну модель комбінованої сонячної панелі з шаром теплоносія з фронтальної сторони. На основі проведеного комп'ютерного моделювання **встановлено**, що наявність теплоносія з фронтальної сторони сонячної панелі призводить до термічної стабілізації сонячних елементів, не охолоджуючи їх. Доведено, що комбіновані термофотоелектричні системи відповідного дизайну можуть бути джерелом не тільки електричної, а і додаткової низькопотенційної теплової енергії.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. На основі розробленого числового алгоритму був створений власний програмний C++код, який має узагальнений характер і може застосовуватися, в разі незначної корекції, для розрахунку середньоінтегральної температури та середнього значення ефективності сонячної панелі різного дизайну і з різним типом сонячних елементів.

2. Результати проведеного дослідження можуть бути використані під час проектування та функціонування сучасних сонячних фотоелектричних станцій. Накопичені під час дослідження дані можуть складати основу для подальшого навчання штучних нейронних мереж, які будуть застосовуватися для прогнозу ефективності обраного типу сонячних панелей та для прийняття рішення про доцільність їх використання в даній місцевості.

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 математики 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 та інформаційних технологій ДНУ.

В той же час в роботі присутні деякі недоліки, а саме:

1. З тексту дисертації незрозуміло, які саме інновації у чисельних алгоритмах було запропоновано автором. В роботі процедуру поєднання класичних алгоритмів та сучасних технологій треба було б висвітлити більш детально, а також зробити акцент на власному інтерактивному програмному продукті.

2. В роботі було б доречним провести математичну верифікацію розроблених числових алгоритмів, оскільки для одновимірних нестационарних нелінійних рівнянь математичної фізики існує багато аналітичних розв’язків, з якими можна було б провести порівняння. Вимога верифікації стосується також власного інтерактивного програмного продукту як доказ його адекватної роботи. На жаль, математична верифікація у дисертації відсутня.

3. У розділі 4 наведено фізичну верифікацію запропонованої математичної моделі у порівнянні з відомими експериментальними даними (п.4.3), але вона розташована дуже невдало – наприкінці розділу після власних параметричних розрахунків (п.4.1, 4.2). З точки зору логічної структури розділу, треба було б зробити навпаки – спочатку фізична верифікація, а потім на її основі власні розрахунки.

4. У розділі 5 наведено результати комп’ютерного моделювання теплового режиму в сонячній термофотоелектричній панелі за наявності додаткового плоского каналу з рухомим теплоносієм (водою). Згідно зі схемою на рис. 5.1 тут реалізується течія типу Хагена-Пуазейля. Інтенсивність теплопередачі скрізь цій плоский канал дуже залежить від гідродинамічних параметрів – перепаду тиску, середньої швидкості рідини в каналі, профілю швидкості поперек каналу, числа Рейнольдса. Але ці важливі параметри у дисертації не згадуються, навіть у вигляді припущення. Наведено лише дві формули (без номерів) для чисел Нусельта для ламінарного та турбулентного режимів течії теплоносія. Але з подальшого тексту не зрозуміло, яка саме формула використовувалась і чому.

Висновок опонента ґрунтується на тому, що наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертації Захарова Дениса Віталійовича. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв’язана актуальна науково-технічна задача, що полягає в



підвищенні ефективності сонячних фотоелектричних систем. Отримані результати можуть знайти широке практичне застосування не тільки під час проектування та функціонування класичних сонячних панелей із різними типами фотоперетворювачів, а і комбінованих термофотоелектричних систем. 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 Захарова Д.В., а саме в 4-х статтях (3 статті в фахових виданні України категорії Б і 1 стаття в міжнародному виданні, яке входить до наукометричної бази Scopus з квартилем Q3) та в 6 тезах міжнародних наукових конференцій, на яких автор виступав особисто для апробації результатів своїх досліджень

Вважаю, що отримані в дисертації наукові результати є достовірними, що підтверджується їх верифікацією. Всі вимоги щодо академічної доброчесності виконані. Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до наукових текстів та публікацій.

Дисертація Захарова Д. В. «Математичне моделювання енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах» 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 Захаров Денис Віталійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

#### Офіційний опонент

Директор Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України,  
доктор фіз.-мат. наук, с.н.с.



Дмитро РЕДЧИЦЬ



Гідніс Дмитро РЕДЧИЦА засвідчую

Гідніс Дмитро РЕДЧИЦА засвідчую  
Гідніс Дмитро РЕДЧИЦА засвідчую