

## **РЕЦЕНЗІЯ**

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

Дисертаційна робота **Захарова Дениса Віталійовича** на тему  
«Математичне моделювання енергопереносу в сонячних фотоелектричних  
системах» присвячена розробці моделей, методів та алгоритмів для  
комп'ютерного моделювання процесу енергопереносув сонячних  
фотоелектричних системах.

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

Загальна енергетична ефективність промислових сонячних  
фотоелектричних систем суттєво знижується при підвищенні їх  
температурного режиму. Тому мінімізація такого температурного впливу є  
актуальною науковою задачею, яка розв'язувалась в дисертації **Захарова Д.В.**  
Експериментальні дослідження температурного режиму сонячних  
фотоелектричних систем можливо проводити лише із використанням  
повномасштабних моделей, які функціонують в місцях локації таких систем.  
Ці дослідження досить коштовні, їх результати неможливо перенести на інші  
подібні системи. Аналітичні методи розрахунку також є  
малоінформативними. Тому математичне та комп'ютерне моделювання  
процесів енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах стає єдиним  
адекватним методом дослідження. Моделювання можливо проводити лише  
на основі таких математичних моделей, в яких враховані все ефекти, що  
виникають під час функціонування сонячних панелей. Саме такі моделі та  
відповідні їм числові алгоритми та комп'ютерні програми 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  
Олеса 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.) цієї кафедри.

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

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану наукової задачі, в  
обґрунтуванні та розробленні основної ідеї та теми дисертації; в  
формулюванні мети і задач дослідження; в теоретичному обґрунтуванні та  
розробленні числових алгоритмів для визначення енергетичних параметрів в  
сонячних панелях; в аналізі та виборі методів врахування кліматичних даних;



в проведенні числових експериментів та формулюванні основних висновків; в порівнянні експериментальних і числових даних та проведенні процедури їх статистичного аналізу. Результати розрахункових та теоретичних досліджень, які виносяться на захист, отримані автором самостійно.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які отримані та розроблені автором, базуються на сучасних методах математичного та комп'ютерного моделювання, зокрема, математичному аналізі, теорії диференціальних рівнянь та рівнянь математичної фізики, методах обчислень, математичній статистиці.

## **3. 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 енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах.

*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.
- на основі нестаціонарної 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.
- 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.

*Дістали подальшого розвитку:*



- Нестационарна 1D математична модель процесу переносу енергії в сонячних фотоелектричних системах, в якій в рамках гіпотези суцільності враховані всі ефекти, що впливають на енергетичні показники таких систем;
- метод побудови нелінійних числових алгоритмів для визначення енергетичних потоків в сонячних панелях;
- методи підвищення точності розрахунків під час реалізації числових алгоритмів.

*Запропоновано:*

- класифікацію сонячних елементів за фізичною природою та методом виготовлення;
- метод побудови функцій апроксимації кліматичних даних, що відповідають місту локації сонячної панелі та отримані зі всесвітніх кліматичних баз.

*Досліджено:*

- розподіл температур за висотою та шириною сонячної панелі, вплив на цей розподіл температурної залежності ККД сонячних елементів;
- розподіл температур в шарах сонячної панелі при середньостатистичних та реальних кліматичних умовах, вплив на цей розподіл швидкості вітру та температури навколишнього середовища;
- енергетична ефективність сонячної панелі при реальних умовах навколишнього середовища та відповідність цієї ефективності значенню, яке декларує виробник;
- розподіл температур в комбінованій термофотоелектричній панелі, вплив на цей розподіл початкової температури теплоносія та його витрати.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Вважаю, що дисертація має велике практичне значення. Створене в роботі власне програмне забезпечення може бути використане для розрахунку сонячних фотоелектричних систем різного дизайну, із різним типом сонячних елементів, що дозволяє проводити порівняння їх енергетичних показників і здійснювати вибір оптимального дизайну та міста локації.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес та використовуються при виконанні курсових та дипломних робіт студентами кафедри комп'ютерних технологій факультету прикладної математики та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

## **4. Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації**



Матеріали дисертації висвітлені в 4 наукових статтях, серед яких 1 стаття опублікована у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus та 3 статті опубліковані в наукових фахових виданнях України категорії Б. Зазначені публікації з достатньою повнотою розкривають основний зміст дисертаційної роботи.

Результати досліджень автора пройшли апробацію та дістали позитивну оцінку на 6 міжнародних науково-практичних конференціях.

## **5. 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* показані основні переваги та недоліки фотоелектричного способу перетворення енергії Сонця, доведена критична залежність ефективності сонячних елементів від температури, обрані типи математичних моделей, які використовуються в даній роботі для визначення температурного та енергетичного режиму сонячних панелей.

У *другому розділі* розроблена двовимірна стаціонарна математична модель енергопереносу в сонячній панелі, яка розв'язана методом простої ітерації із використанням власного програмного коду. Отримані результати дозволили оцінити середню температуру та середню ефективність сонячної панелі та порівняти ці значення з тими, що надає виробник.

У *третьому розділі* презентовані етапи розробки нестационарної одновимірної математичної моделі та відповідного числового алгоритму для визначення розподілу температур в шарах сонячної панелі при постійних умовах навколишнього середовища. В ході комп'ютерного моделювання визначено вплив деяких кліматичних та проектних параметрів на температурний режим в сонячній панелі. Крім того, базуючись на отриманих даних, стає можливим оцінити теплову інерційність сонячної панелі, що є важливим при її функціонуванні.

У *четвертому розділі* проводиться удосконалення нестационарної одновимірної моделі шляхом введення реальних кліматичних даних з міста локації сонячної панелі. Важливим здобутком автора вважаю створення відповідного інтерактивного програмного продукту, в якому передбачена апроксимація кліматичних даних зі всесвітніх кліматичних баз, розрахунок нестационарного температурного поля та визначення ефективності сонячної панелі в реальному часі. Адекватність отриманих числових результатів підтверджується шляхом порівняння із даними натурного експерименту.

У *п'ятому розділі* наведені результати моделювання розподілу температур у комбінованій термофотоелектричній панелі обраного дизайну. Це результати показують перспективи використання комбінованої системи для отримання додаткової теплової енергії. В той же час доведено, що



наявність шару теплоносія суттєво не впливає на температурний режим сонячних елементів.

Робота завершується висновками, які впливають з її змісту, 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.

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**

1. В роботі розглядаються типи сонячних елементів, в яких ефективність падає при підвищенні температури. В той же час існують сонячні елементи, в яких ефективність зростає при нагріванні. Як це враховувалось в дослідженні?
2. Автор детально описує побудову числового алгоритму для розв'язання нелінійного двовимірного рівняння Пуассона методом простої ітерації. Але в роботі не наведена кількість вузлів та інші кількісні показники, що виникають при комп'ютерній реалізації відповідного алгоритму.
3. Як враховувались показники заломлення захисного скла та теплоносія під час дослідження термофотоелектричної сонячної панелі?

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

Дисертаційна робота Захарова Д.В. «Математичне моделювання енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах» повністю відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

#### **11. Загальні висновки**

В цілому, дисертаційна робота Захарова Дениса Віталійовича є завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Отримані науково обґрунтовані теоретичні та числові результати утворюють нову ланку досліджень в галузі розробки та удосконаленню:

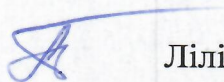
- математичних моделей для опису процесів енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах;
- методу визначення реальних кліматичних даних у місці локації сонячної панелі та врахування цих даних у розроблених математичних моделях та комп'ютерних алгоритмах;
- числових алгоритмів для проведення комп'ютерного моделювання та розрахунку енергетичних потоків у фотоелектричних та термофотоелектричних системах перетворення енергії Сонця.



Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість та достовірність, а також практичну цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Захарова Дениса Віталійовича на тему «Математичне моделювання енергопереносу в сонячних фотоелектричних системах», 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 Захаров Денис Віталійович 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 і  
матеріалознавства Дніпровського  
національного університету імені  
Олеся Гончара



Лілія НАКАШИДЗЕ

Підпис Лілії НАКАШИДЗЕ  
засвідчую:

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



Тетяна ХОДАНЕН