

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Масаликіна Станіслава Сергійовича «Статистичне моделювання енергетичних потоків в системах концентрації енергії Сонця»*, яку подано на здобуття наукового 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 термодинамічне перетворення сонячного випромінювання. Загальна ефективність термодинамічних сонячних енергетичних установок суттєво перевищує ефективність більшості фотоелектричних систем і має тенденції до зростання при збільшенні потужності. Елементи термодинамічних станцій майже не деградують з часом, мають економічні та екологічні переваги при функціонуванні та утилізації. Однак ефективність термодинамічних систем напряму залежить від ефективності їх систем прийому, що містять концентратори сонячного випромінювання різної геометрії. Геометрія концентратора відповідає температурному рівню системи перетворення. Але ефективність перетворення суттєво залежить від якості поверхні концентратора (наявності неточності) та точності орієнтації концентратора на Сонце. В роботі методами статистичного моделювання досліджується саме вплив цих факторів на енергоперенос в системі «Сонце – концентратор – теплоприймач». Тому тема дисертаційного дослідження Станіслава Сергійовича Масаликіна є безумовно актуальною та своєчасною.

Представлена дисертація складається зі вступу та чотирьох 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 перетворення сонячного випромінювання, визначаються переваги термодинамічного перетворення. Автор проводить типізацію термодинамічних систем в залежності від їх температурного рівня та відповідної геометрії концентратора. Для визначеності в якості фізичної моделі обирається параболоїдний концентратор із відкритим теплоприймачем.

Автор багато уваги приділяє огляду сучасних сонячних енергетичних систем з параболоїдними концентраторами, наводить приклади реальних діючих пристроїв, описує їх характеристики.



В розділі наведені геометричні характеристики параболоїдного концентратора та співвідношення між ними, визначені основні параметри, що впливають на енергетичні показники в системах концентрації. Автор проводить глибокий аналіз методів дослідження переносу випромінювання в системах концентрації з параболоїдними концентраторами та робить на основі такого аналізу висновок про перспективні підходи до розрахунку відповідних параметрів теплообміну. Серед таких підходів суттєві переваги має комп'ютерне моделювання на основі методу Монте-Карло. Саме цей метод обирається автором для дослідження в даній роботі.

Другий розділ цілком присвячено побудові математичної моделі процесів переносу випромінювання в системах концентрації. На першому етапі розглядаються два можливих підходи до побудови таких моделей, серед яких автор надає перевагу фотометричному підходу. В рамках фотометричного підходу проводиться розробка узагальненої математичної моделі процесу концентрації, яку можна застосовувати для розрахунку систем концентрації будь-якої геометрії.

На другому етапі робиться систематизація методів спрощення та конкретизації узагальненої математичної моделі, формалізуються можливі припущення. Автор пропонує систематизувати можливі припущення в залежності від виду функції індикатриси (розподілу випромінювання в пучці сонячних променів) та методу врахування неточності поверхні концентратора. Для подальшого дослідження обирається рівномірний розподіл випромінювання в пучці та метод врахування неточності на основі ймовірнісних розподілів.

На третьому етапі, на основі узагальненої математичної моделі та з урахуванням обраних припущень, проводиться розробка математичної моделі для параболоїдного концентратора, яка обирається базовою для подальшого комп'ютерного моделювання.

Третій розділ присвячено створенню алгоритму Монте-Карло та відповідного комп'ютерного коду для проведення на його основі числового дослідження по визначенню щільності теплового потоку в фокальній площині параболоїдного концентратора. Автор наводить всі етапи побудови відповідного статистичного алгоритму, який включає векторний аналіз сонячних променів, що прямують від Сонця на концентратор та від концентратора на теплоприймач. Окремо в числовий алгоритм вводиться ітераційна процедура для визначення необхідної кількості статистичних випробувань, яка буде задовольняти обраному рівню точності та достовірності. Числовий алгоритм містить також процедуру генерації випадкових кутових відхилень поверхні, які підпорядковуються нормальному та рівномірному законам розподілу.

На основі створеного числового алгоритму автор розробив власний програмний продукт на мові програмування C++ для комп'ютерного моделювання енергетичних потоків в системі «Сонце – параболоїдний



концентратор – теплоприймач». В результаті проведеного моделювання знайдені розподіли щільності концентрованого сонячного потоку в фокусі математично ідеального та реального концентратора. Визначено вплив неточності поверхні концентратора на його енергетичні показники.

Окремо в розділі проведено дослідження впливу ефекту розфокусування на значення щільності сонячного потоку в фокусі, визначено діапазон можливих та критичних значень відповідних кутів розфокусування. При порівнянні впливу на енергетику системи неточності поверхні та ефекту розфокусування автор спостерігав нові енергетичні ефекти, які необхідно враховувати при проектування та експлуатації систем із параболоїдними концентраторами.

Четвертий розділ присвячено верифікації результатів, отриманих в ході комп'ютерного моделювання. Ця верифікація проводилась шляхом порівняння із наближеними аналітичними результатами. Для цього розроблена математична модель для параболоїдного концентратора була розв'язана наближеним аналітичним методом. Аналітичний розв'язок знаходився при таких же припущеннях, що і числовий, але із використанням деяких додаткових спрощень. Етапи пошуку наближеного аналітичного розв'язку автор детально описує та додає відповідні ілюстрації, що спрощує аналіз отриманих значень та співвідношень. Слід відмітити, що ці співвідношення мають відносно простий вид і можуть використовуватись для оцінки енергетичних параметрів на початкових етапах дослідження систем з параболоїдними концентраторами. Вважаю, що отримання такого наближеного аналітичного розв'язку є вагомим здобутком в даній дисертаційній роботі.

При порівнянні наближеного аналітичного та числового розв'язків спостерігається добрий збіг результатів, що свідчить про адекватність розробленої математичної моделі та відповідного числового алгоритму Монте-Карло.

В роботі отримано ряд нових наукових результатів, а саме:

1. На основі узагальненої математичної моделі розроблений числовий алгоритм Монте-Карло та **створений власний програмний продукт** для визначення основних енергетичних характеристик в системах концентрації сонячного випромінювання із урахуванням неточності поверхні концентратора та ефекту його розфокусування.
2. **Вперше визначено** вплив сумарної неточності поверхні реального концентратора на щільність теплового потоку в його фокальній площині при фіксації неточності в частках кута розкриття Сонця. Порівняно значення щільності теплового потоку від реального концентратора при рівномірному та нормального законах розподілу неточностей поверхні.
3. **Вперше встановлений факт** взаємної компенсації неточності поверхні концентратора та ефекту його розфокусування. Знайдено, що



реальні концентратори із незначними неточностями та розфокусуванням можуть бути більш енергетично ефективні, ніж математично ідеальні з розфокусуванням.

4. **Вперше проведено верифікацію** отриманих методом Монте-Карло числових даних для щільності теплового потоку шляхом порівняння із даними **знайденого аналітичного розв'язку**, в якому неточність поверхні враховується на основі значення інтегральної ймовірності.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. На основі розробленого числового алгоритму Монте-Карло був створений власний програмний C++код, який має узагальнений характер і може застосовуватися, в разі незначної корекції, для розрахунку концентраторів будь-якої геометрії. Крім того, створений програмний код має гнучку та прозору структуру, що дозволяє його трансформувати в залежності від типу обраних припущень та методів врахування неточності.

2. Результати проведеного дослідження можуть бути використані під час проектування та функціонування сучасних сонячних енергетичних установок різного температурного рівня та призначення, в складі яких знаходиться концентратор сонячного випромінювання відповідної геометрії.

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 ДНУ

Загальні висновки кандидатської дисертації Масаликіна С.С. розгорнуті та обґрунтовані: розкрито результати дисертаційного дослідження та окреслене авторське розуміння сутності заявленої теми, що свідчить про належний рівень наукової компетенції та професійної кваліфікації дисертанта. В той же час необхідно вказати загальні зауваження в дисертаційній роботі Масаликіна С.С., що мають переважно дискусійний характер:

1. Математична модель роботи системи енергетичних потоків в системах концентрації енергії Сонця (розділ 2, 3) є статичною та не містить залежностей від часу. Тобто термодинамічні перетворення розглядаються як сталі або миттєві. В перспективі, наявність залежностей від часу була б дуже



корисною для розрахунку енергетичної ефективності окремої установки за певний відрізок часу, наприклад за добу.

2. Здобувачем було проведено верифікацію отриманих методом Монте-Карло числових даних для щільності теплового потоку шляхом порівняння із даними знайденого аналітичного розв'язку. Крім того, є сенс провести порівняння розрахункових енергетичних показників параболоїдного концентратора з відповідними даними реальних конструкцій, приклади яких наведено у розділі 1.

3. У дисертації знайдено максимальне значення щільності концентрованого потоку в фокусі ідеального та реального параболоїдного концентратора та розподіл щільності в фокусній площині. На цій основі було б доречно сформулювати напрями поліпшення енергетичних показників для промислових конструкцій, які працюють за схемою «Сонце – параболоїдний концентратор – теплоприймач».

*Висновок опонента* ґрунтується на тому, що наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертації Масаликіна Станіслава Сергійовича. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв'язана актуальна науково-технічна задача, що полягає в підвищенні ефективності систем прийому сонячних термодинамічних станцій з концентраторами. Отримані результати можуть знайти широке практичне застосування не тільки в сонячних термодинамічних системах, а і в будь-яких сонячних енергетичних системах, що містять в своєму складі концентратори різної геометрії. Це вказує на велике теоретичне та практичне значення сформульованих в дисертації наукових положень, висновків та рекомендацій.

Наукові здобутки в повній мірі висвітлені в публікаціях Масаликіна С.С., а саме в 3-х статтях (1 стаття в фаховому виданні України категорії Б та 2 статті в різних міжнародних виданнях, які входять до наукометричної бази Scopus, при чому одне з них з квантилем 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 новими і достовірними, що підтверджується їх верифікацією. Всі вимоги щодо академічної доброчесності виконані. Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до наукових текстів та публікацій.

Дисертація Масаликіна С.С. «Статистичне моделювання енергетичних потоків в системах концентрації енергії Сонця» 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 Масаликін Станіслав 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.

