

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
*Хайдурова Владислава Володимировича*  
*«Методи та програмні засоби реалізації моделей основних класів  
обернених задач теплопровідності»,*  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та  
обчислювальні методи

### 1. Актуальність дисертаційної теми та її зв'язок з державними науковими програмами

Широке поширення процесів теплообміну в різних сферах людської діяльності привело до необхідності раціонального контролю над їх перебігом. Для цього, як правило, визначають дві величини: температуру та тепловий потік. Вимірювання температури традиційно добре забезпечене відповідними приладами, чого не можна сказати про тепловий потік і його щільність.

За допомогою теплометричної апаратури можуть бути вирішені такі задачі, як визначення теплового потоку з метою визначення втрат теплоти від теплотрас, будинків і споруд, технологічних пристроїв; визначення теплофізичних характеристик з метою дослідження ефективності теплозахисних і теплопередавальних властивостей матеріалів і конструкцій; визначення тепловиділення та теплопоглинання технічних і біологічних об'єктів. Але існує низка конструкторських об'єктів, при роботі яких неможливо використати засоби теплометрії для оцінки ефективності й надійності їх роботи. Тому такі науково-прикладні проблеми вимагають проведення обчислювальних експериментів перед проектуванням конкретного конструкторського об'єкту, оскільки проектування таких об'єктів без розуміння самого процесу теплообміну є неможливим та дорогоцінним, а надійність його не може бути оцінена лише експериментально.

Комп'ютерне моделювання великої кількості науково-технічних завдань проводиться за допомогою обернених задач теплопровідності. За допомогою таких задач можна здійснювати ідентифікацію теплофізичних характеристик досліджуваних об'єктів, а також здійснювати керування ними. Моделювання відомих класів обернених задач, у тому числі й обернених задач теплопровідності, має низку проблем, основними з яких є: коректність постановки; тривалий час розв'язання таких задач на суперкомп'ютерах.

З огляду на це дисертаційна робота Хайдурова В.В., яка присвячена розв'язанню важливого науково-прикладного завдання розробки обчислювальних методів та програмних засобів розв'язування моделей основних класів обернених задач теплопровідності є актуальною та своєчасною. Завдання розробки методів розв'язування вказаних задач є завданням високого рівня пріоритетності та складності, а також є економічно

УПМЕ Вх 248  
03.09.2019р

вигідним при проектування різних теплоенергетичних комплексів, наприклад, двигунів внутрішнього згорання, оскільки, як вже було зазначено, час на розв'язування таких задач є досить тривалим.

Отже актуальність питання і поєднання мети та поставлених задач дисертаційного дослідження Хайдурова Владислава Володимировича підтверджує його теоретичну та практичну значимість, а також свідчить про його доцільність та актуальність при вивченні природи фізичних процесів у складних об'єктах і системах. Робота виконана в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки України, зокрема, державної науково-дослідної теми: «Розробка методик розв'язку фундаментальних задач міцності та руйнування кусково-однорідних тіл, скомпонованих з інтелектуальних матеріалів» (№ ДР 0115U002393).

## **2: - Обґрунтовність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність**

Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Хайдурова В.В. достатньо обґрунтовані:

- застосуванням сучасних методів досліджень, в тому числі чисельних методів розв'язування задач математичної фізики, методів оптимізації та моделювання;

- використанням математичного моделювання на ПК з використанням пакетів прикладних програм;

- експериментальними дослідженнями, виконаними коректно на високому науковому рівні.

Висновки, які сформульовані в дисертаційній роботі, містять нові наукові положення щодо розробки і модифікації методів розв'язування основних класів обернених задач теплопровідності.

Основні результати дисертаційної роботи використані при розрахунках оптимізації температур внутрішніх нагрівачів промислової печі та при дослідженні процесу теплообміну у вимірювальній камері з радіаційним способом формування теплового потоку. У цій камері проводиться калібрування засобів вимірювання за допомогою оцінки однорідності розподілу поверхневої густини теплового потоку на теплосприймальній поверхні. Математична модель отримана та апробована при Інституті технічної теплофізики НАН України.

Апробація основних наукових положень дисертації проведена на 8 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях, що відповідають тематиці роботи.

Достовірність наукових результатів також забезпечена розробленим програмним комплексом, що дозволяє розв'язувати прикладні промислові фізико-технічні задачі, які зводяться до розв'язування обернених задач теплопровідності. Достовірність практичної частини дисертації підтверджена чисельними експериментами та відповідними актами впровадження.

### **3. Наукова новизна дисертаційної роботи**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження Хайдурова В.В. полягає у розробці комплексних методів і алгоритмів визначення чисельних розв'язків основних класів лінійних та нелінійних багатовимірних обернених задач теплопровідності, що дозволило суттєво зменшити час обчислень для отримання розв'язку конкретної оберненої задачі теплопровідності. До основних наукових здобутків дисертанта необхідно також віднести такі:

– уперше запропоновано математичну модель протікання процесу теплообміну в замкненій системі з дифузійними поверхнями для вимірювання густини теплового потоку на поверхні тепловідводу, за допомогою якої можна здійснювати калібрування сенсорів та розробляти вимірювальний еталон густини теплового потоку;

– уперше запропоновано інтерполяційний метод для обчислення елементів матриці Гессе при знаходженні мінімуму квадратичного функціонала в класичній постановці ОЗТ, що привело до зменшенні кількості викликів процедури розв'язування відповідних прямих задач теплопровідності на кожній ітерації методів багатовимірної безумовної оптимізації;

– удосконалено класичний метод Ньютона низкою модифікацій: уведення оптимального змінного кроку на кожній ітерації методу; уведення схеми типу «предиктор-коректор», що дозволило підвищити точність обчислень, а також ще зменшити загальну кількість обчислень при розв'язуванні різних класів багатовимірних лінійних і нелінійних обернених задач теплопровідності;

– удосконалено метод побудови початкового наближення для побудови ітераційного процесу мінімізації квадратичного функціонала в оптимізаційній постановці різних класів обернених задач теплопровідності, що дало змогу зменшити загальну кількість ітерацій отриманих методів оптимізації.

### **4. Повнота викладення основних результатів в опублікованих працях**

Апробація основних наукових положень та прикладних аспектів дисертаційної роботи проведена шляхом доповідей та їх обговорень на науково-технічних конференціях.

За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць, серед яких: 8 статей, зокрема, 3 статті у виданнях, включених у міжнародні наукометричні бази та 1 стаття іноземною мовою, яка включена до міжнародної наукометричної бази Scopus; 8 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового

ступеня кандидата технічних наук. Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації і достатньо повно відображає основні положення дослідження.

### **5. Практична цінність результатів дисертаційної роботи**

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

– розроблено програмний комплекс у прикладному пакеті MATLAB, який складається з шести функціональних модулів. За допомогою цього комплексу можна знаходити чисельні розв'язки різних класів обернених задач теплопровідності, зокрема, задач відновлення початкової умови, задач відновлення граничних умов, задач відновлення коефіцієнта теплопровідності;

– отримано прикладну математичну модель протікання процесу теплообміну в замкненій системі з дзеркальними дифузійними поверхнями при Інституті технічної теплофізики НАН України, за допомогою якої можна здійснювати калібрування сенсорів;

– основні результати дисертаційної роботи використані при дослідженні різних процесів теплообміну при Інституті технічної теплофізики НАН України. Спрощені моделі дисертаційного дослідження активно використовуються під час проведення лабораторних занять із профільних технічних дисциплін (математичне моделювання складних систем, теорія керування та методи обчислень) у Київському міжнародному університеті.

### **6. Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота виконана в Черкаському технологічному університеті МОН України та Київському міжнародному університеті. Мета дослідження полягає у створенні та модифікації сучасних методів чисельного розв'язування обернених задач теплопровідності та у їхній програмній реалізації для розв'язування різних класів обернених задач теплопровідності, а також у створенні прикладних математичних моделей реальних процесів теплообміну, які зводяться до розв'язування обернених задач теплопровідності.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є процеси теплообміну та математичні моделі промислових фізико-технічних процесів теплообміну, які зводяться до моделювання обернених задач теплопровідності, а предметом дослідження – чисельні методи розв'язування обернених задач теплопровідності та моделі процесів теплообміну, які зводяться до пошуку розв'язків різних класів обернених задач теплопровідності.

Для досягнення мети роботи здобувач виконав значний комплекс досліджень, які потребували освоєння низки відомих сучасних методів розв'язування обернених задач. Зокрема, дослідження, які проводив здобувач, базуються на використанні апарату чисельних методів

розв'язування основних задач математичної фізики, методів оптимізації та методів математичного й комп'ютерного моделювання.

У процесі виконання дисертаційного дослідження здобувач *вирішив наступні науково-практичні завдання:*

– модифікував існуючі методи багатовимірної оптимізації, що базуються на класичному методі Ньютона, методі найшвидшого спуску, методах типу «предиктор-коректор», введенні функціональних рядів для знаходження якісного початкового наближення до пошуку невідомого параметра. Отримані методи дали змогу підвищити точність розрахунків для знаходження чисельних розв'язків різних класів обернених задач теплопровідності;

– зменшив загальну кількість обчислень для розв'язування трьох основних класів обернених задач теплопровідності за рахунок введення процедури інтерполяції поверхнями другого порядку для мінімізації квадратичного функціонала, який міститься в оптимізаційній постановці обернених задач теплопровідності в цілому. Такий підхід дає можливість зменшити загальну кількість викликів процедури розв'язування прямої задачі теплопровідності для розв'язання конкретної оберненої задачі;

– розробив комплекс програм для знаходження чисельних розв'язків основних класів багатовимірних ОЗТ, який складається з шести основних програмних модулів. Програмний комплекс розроблено в пакеті прикладної математики MATLAB. Комплекс програм містить один із модулів, за допомогою якого здійснюється експортування триангуляції розрахункової області з пакету COMSOL Multiphysics до пакету MATLAB, що дає змогу аналізувати об'єкти складної геометричної форми у 2- та 3-вимірному просторах відповідно;

– здійснив порівняльний аналіз отриманих у дисертаційній роботі методів розв'язування різних класів лінійних і нелінійних багатовимірних ОЗТ за критерієм збіжності методів та за критерієм загальної кількості викликів процедури розв'язування ПЗТ;

– виконав апробацію отриманих у роботі методів розв'язування багатовимірних ОЗТ на різних прикладних задачах ідентифікації теплофізичних характеристик досліджуваних об'єктів теплоенергетики.

Отже, результати виконання вище наведених завдань дали змогу здобувачеві комплексно підійти до науково-технічного завдання та вирішити його.

## **7. Структура та зміст дисертації**

Дисертація складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 152 найменувань, 6 додатків та містить 177 сторінок основного тексту, 97 рисунків і 27 таблиць. Загальний обсяг дисертації 216 сторінок.

Вступ дисертаційної роботи містить актуальність роботи, сформульовані мету та завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення роботи, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію та структуру роботи.

Перший розділ містить аналіз методів та алгоритмів розв'язування різних класів обернених задач теплопровідності в залежності від постановки науково-технічного завдання, проблематики розв'язування лінійних та нелінійних обернених задач теплопровідності в цілому. Основний акцент проблематики розв'язування таких задач відведений на процесорний час обчислень, які потрібні для отримання чисельного розв'язку однієї технічної оберненої задачі теплопровідності. У розділі міститься інформація щодо шляхів прискорення отримання чисельних розв'язків таких задач.

У даному розділі автором проведено сучасну класифікацію варіантів постановок обернених задач теплопровідності в різних галузях науки й техніки. Однією з найактуальніших постановок різних класів обернених задач теплопровідності є оптимізаційна. Вона полягає у знаходженні глобального мінімуму квадратичного функціонала. Обмеження на функціонал накладаються у вигляді рівняння теплопровідності. Виходячи із сучасної термінології обернених задач в цілому, обернені задачі теплопровідності можна віднести до фізико-технічних задач на умовний екстремум з обмеженнями у вигляді диференціальних рівнянь математичної фізики.

Автор дисертаційної роботи показав, що перспективними шляхами прискорення існуючих методів розв'язування обернених задач у оптимізаційній постановці є: створення оптимального методу оптимізації функціонала з мінімальною кількістю викликів функції розв'язування відповідних прямих задач теплопровідності; створення та модифікація методів розв'язування систем нелінійних рівнянь, до яких зводиться різницеве представлення нелінійного рівняння теплопровідності, які базуються на використанні методу кінцевих різниць та кінцевих елементів.

Другий розділ містить обчислювальні методи розв'язування основних класів багатовимірних лінійних та нелінійних задач теплопровідності.

Автором описані методики: побудови алгоритму знаходження умовного екстремуму функцій багатьох змінних; побудови алгоритму знаходження умовного екстремуму функцій, на який накладено обмеження у вигляді звичайного диференціального рівняння. Така методика дає змогу знаходити чисельні розв'язки задач, які зводяться до розв'язування нелінійних обернених задач, зокрема, обернених задач теплопровідності.

Розділ містить опис отриманих автором модифікацій багатовимірних обчислювальних методів оптимізації, які безпосередньо використовуються при розв'язуванні описаних у роботі прикладних задач. Методи базуються на класичному методі Ньютонів. Першою модифікацією класичного методу Ньютонів було введено оптимальний крок на кожній його ітерації за рахунок використання методу найшвидшого спуску для розв'язання задачі одновимірної оптимізації (пошук значення кроку). Другою суттєвою

модифікацією класичного методу Ньютона є використання схеми типу «предиктор-коректор», що дає змогу зменшити загальну кількість обчислень при розв'язанні конкретної нелінійної оберненої задачі теплопровідності. За цією схемою здійснюється уведення проміжної точки (вектору шуканих значень), корегування якої здійснюється модифікацією класичного методу Ньютона.

Третьою розробленою модифікацією класичного методу Ньютона є введення методу інтерполяції чисельних похідних при знаходженні матриці других похідних у методі Ньютона. Такий підхід теж зменшує кількість викликів процедури розв'язування відповідних прямих задач теплопровідності.

Також автором запропоновано процедуру побудови початкового наближення до шуканої умови в конкретному класі обернених задач теплопровідності. Це дає змогу зменшити кількість ітерацій модифікованих методів оптимізації.

Третій розділ присвячено тестуванню отриманих у попередньому розділі методів на різних класах обернених задач теплопровідності: задачі відновлення початкової умови (лінійні та нелінійні), задачі відновлення граничних умов (лінійні та нелінійні) та задачі відновлення коефіцієнта теплопровідності (лінійні та нелінійні).

Автором показана ефективність отриманих методів пошуку розв'язків різних класів обернених задач теплопровідності. Ефективність підтверджується низкою таблиць та графіків збіжності отриманих методів порівняно з класичними.

Четвертий розділ присвячено прикладним моделям, які зводяться до знаходження чисельних розв'язків основних класів обернених задач теплопровідності, описаних раніше. Автором розглянуто дві прикладні математичні моделі: модель оптимізації температур промислової печі та модель протікання процесу теплообміну в замкненій системі з дифузійними поверхнями для вимірювання густини теплового потоку на поверхні тепловідводу.

На першій прикладній математичній моделі автор апробував розроблені ним обчислювальні методи розв'язування основних класів обернених задач теплопровідності. Оптимізація роботи промислових та муфельних печей є досить актуальним завданням виробництва. Основна мета запропонованої моделі – це підвищення ефективності роботи печі, для цього в неї вбудовуються нагрівачі. Нагрівачі загалом можуть бути довільної геометричної форми. Позиції цих нагрівачів задаються геометричним положенням на площині. Потрібно визначити температуру цих нагрівачів, щоб результат їх дії був найближчий до наперед заданого значення на об'єкті, який поміщено до цієї печі. Розглянуто лінійний та нелінійний випадки розв'язання задачі. Автором наведена математична модель визначення оптимального розташування нагрівачів у печі при заданих на них значеннях температур.

Хайдуровим В.В. розроблена друга прикладна математична модель протікання процесу теплообміну в замкненій системі з дзеркальними дифузійними поверхнями для вимірювання густини теплового потоку на поверхні тепловідводу, яка описується системою рівнянь Нав'є-Стокса, рівнянням теплопровідності та рівнянням нерозривності. Модель отримана та апробована при Інституті технічної теплофізики НАН України. Отримані результати розрахунків підтверджені актами про впровадження результатів дисертаційної роботи (додаток Е).

Додатки дисертаційної роботи містять інформацію про структуру розробленого програмного комплексу моделювання основних класів обернених задач теплопровідності, програмний код розв'язання стаціонарного рівняння теплопровідності, технологію створення геометрії та розрахункової сітки досліджуваних об'єктів у прикладних програмних пакетах MATLAB та COMSOL Multiphysics, відомості про основні характеристики персонального комп'ютера, на якому проводились усі чисельні експерименти, перелік наукових праць за темою дисертаційного дослідження, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Загалом можна зазначити, що дисертація Хайдурова В.В. є закінченою науковою роботою, в якій отримані нові наукові результати, що мають теоретичну та практичну цінність. Робота характеризується завершеною, вдалою структурою і логічною послідовністю викладення матеріалу. Висновки у розділах, а також загальні висновки відповідають її змісту, конкретно і стисло висвітлюють основні наукові результати.

Дисертація й автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

#### **8. Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційного дослідження**

Разом з тим, щодо дисертаційній роботі слід зробити наступні зауваження:

1. При описі методів знаходження мінімуму функціонала (п.1.4.2) вказано методи та алгоритми ройового інтелекту (стор. 38–39), але їх сутність, переваги та недоліки не описані. В подальшому в роботі про ці методи взагалі не згадується.

2. У розділі 2 наведено розроблені програмні коди для обчислення мішаних похідних другого порядку (стор. 69, 71), але не вказано програмний пакет, в якому вони були створені, не аргументовано його вибір. Хоча потім в п. 3.1 наведене необхідне обґрунтування і опис засобів моделювання.

3. В тексті роботи немає опису до рисунків 2.5, 3.9, 3.55 – 3.62, таблиць 3.21, 3.22.

4. Відсутній рисунок 3.19 (пропущений при нумерації).

5. При описі структури програмного комплексу (п.3.2) деякі положення дублюють інформацію, наведену потім в додатках Б та В (у додатку В повністю повторюються інформація, вже що міститься п. 3.2), але разом з



тим не в усіх його модулях вказано, які програмні пакети в ньому застосовано та чітко не сформульована послідовність взаємодії між ними.

6. Дисертаційна робота містить описки та помилки (пропущені або переставлені місцями букви в словах, відсутні деякі індекси в формулах, стилістично невдало побудовані речення). Очевидно, більшість цих описок є результатом невнесення потрібних коректур при комп'ютерному копіюванні подібних виразів.

### **Висновок**

Наведені зауваження та побажання жодним чином не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи Хайдурова В.В., яка є завершеним науковим дослідженням, що містить отримані особисто здобувачем нові наукові результати створення і модифікації сучасних обчислювальних методів і математичних моделей дослідження процесів теплообміну, які зводяться до розв'язування обернених задач теплопровідності.

Оформлення дисертації і автореферату в цілому, з урахуванням зазначених вище зауважень, відповідає діючим нормативним документам. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02–математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки) і профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи «*Методи та програмні засоби реалізації моделей основних класів обернених задач теплопровідності*» можна зробити висновок про те, що за актуальністю вирішеного науково-прикладного завдання, отриманими науковими результатами, новизною і практичною цінністю, вона відповідає пп. 9, 10, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. за № 567 зі змінами від 27 липня 2016 р., а її автор, *Владислав Володимирович Хайдуров*, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

### **Офіційний опонент**

кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Дніпровського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

  
(підпис) Н.М. Волосова

Підпис кандидата технічних наук, доцента Волосової Н.М. засвідчую:

Вчений секретар Дніпровського державного технічного університету



  
(підпис) Л. М. Сорокіна