

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Хайдурова Владислава Володимировича

**«Методи та програмні засоби реалізації моделей основних класів
обернених задач теплопровідності»,**

яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Для вирішення проблем енерго- та ресурсозбереження актуальними стають дослідження з модернізації теплоенергетичних об'єктів, енергоємних технологій, впровадження нових енергоефективних матеріалів. За цих умов суттєвого значення набувають вимірювання, оперативний контроль і регулювання теплових процесів, інформативною характеристикою яких є тепловий потік. Якісне метрологічне забезпечення вимірювань у теплометричній галузі – це шлях до скорочення бюджетних витрат на підготовку та проведення відповідних досліджень. Проблемі розробки математичних моделей та розробці методів основних класів обернених задач приділялась велика увага дослідників. Розвиток технічних приладів нагріву призводить до суттєвих ускладнень граничних та початкових умов у розв'язку теплофізичних задач тому важливими були і залишаються задачі:

- створення та модифікації існуючих методів розв'язку основних класів обернених задач теплопровідності;
- створення математичних моделей реальних процесів, які спрямовані на ідентифікацію внутрішніх теплофізичних характеристик складних теплофізичних систем.

Таким чином, оскільки здобувач вирішує ці актуальні задачі, то і дисертаційна робота Хайдурова В.В. є актуальною науковою роботою, за результатами якої можна знаходити й аналізувати чисельні розв'язки різних прикладних актуальних задач промисловості.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Представлена дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст роботи викладено на 178 сторінках тексту, проілюстровано 67 рисунками та 27 таблицями та 6 додатками. Список використаних бібліографічних джерел містить 152 найменування. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 216 сторінок.

Дисертаційна робота виконана відповідно до тематики науково-дослідних робіт, які проводились у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара за темою «Розробка методик розв'язку фундаментальних задач

*УПЧЕ Вк 250
06.09.2019р*

міцності та руйнування кусково-однорідних тіл, скомпонованих з інтелектуальних матеріалів» (державний реєстраційний номер 0115U002393).

Зміст дисертаційної роботи, стиль та мова викладення, якість ілюстрацій відповідають вимогам МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

В анотації наведено узагальнений короткий виклад основного змісту дисертації, основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення. Наводиться список публікацій здобувача з основними науковими результатами за темою представленої роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, проблематику поставлених задач та методів їх розв'язування, сформульовано об'єкт дослідження, предмет дослідження, мету та завдання досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, відмічено наукову новизну та практичну цінність отриманих у дисертаційній роботі результатів.

У першому розділі наведено аналітичний огляд сучасного стану та проблематики розв'язування лінійних та нелінійних обернених задач теплопровідності, проаналізовано світові тенденції розвитку методів та алгоритмів аналізу теплофізичних систем та методів визначення їхніх управляючих параметрів.

До викладеного матеріалу першого розділу є декілька зауважень:

1. Оскільки розв'язок та оптимізація параметрів відбувається не в оперативному режимі виникають сумніви стосовно важливості часу розв'язку CAP;
2. Зважаючи на важливість стійкості та збіжності необхідно ними і користуватись при обранні методу оптимізації. Є цілий клас методів оптимізації в яких відсутні недоліки притаманні класу методів Ньютона;
3. Проблеми точності роботи чисельних методів завжди була і є актуальною, але вона обмежується точністю інженерних методів розрахунку прийнятих для даної галузі;
4. Під прямими методами завжди розуміли методи оптимізації, що використовують для пошуку екстремумів лише значення функції цілі (стор. 30).

У другому розділі описано низку отриманих здобувачем методів знаходження мінімуму квадратичного функціонала, який міститься у загальній оптимізаційній постановці обернених задач теплопровідності (ОЗТ). Більшість класів ОЗТ записується у вигляді задач умовної оптимізації, причому обмеженням у таких задачах є саме рівняння теплопровідності. Для лінійних ОЗТ обмеження на цільовий квадратичний функціонал є лінійне рівняння теплопровідності, а для нелінійних – нелінійне рівняння теплопровідності.

Розділ містить опис методики розв'язування задач на умовний екстремум для різних випадків (для лінійних та нелінійних обмежень на цільову функцію).

Всі методи, описані у даному розділі є чисельними. Автором отримано три основні модифікації класичного методу Ньютона для розв'язування різних класів нелінійних ОЗТ. Модифікації отриманих методів базуються на:

- побудові проміжних значень (значень параметрів у вузлах сітки), за рахунок яких здійснюється прогноз з використанням методу найшвидшого спуску;
- модифікаціях класичного методу Ньютона зі змінним кроком. Дві перші модифікації мають другий порядок точності, а третя модифікація – третій. Всі отримані автором модифікації класичного методу Ньютона базуються на заміні на кожній ітерації матриці других похідних (гессіан) на еквівалентну уточнену матрицю з урахуванням проміжних значень, які отримані раніше;
- інтерполюванні багатовимірними поверхнями другого порядку чисельних похідних модифікованого гессіану для знаходження усіх його недіагональних елементів. Такий метод дає можливість в 3–4 рази зменшити кількість викликів процедури розв'язування прямої задачі теплопровідності (ПЗТ);
- побудові початкових наближень до шуканого чисельного розв'язку конкретної (лінійної та нелінійної) ОЗТ. Побудова таких наближень базується на методі розкладу функції в багатовимірний ряд Фур'є (наприклад, для початкової умови), а також розклад функції в ряд за повною системою ортогональних функцій (наприклад, для граничної умови та коефіцієнта теплопровідності).

При розв'язуванні лінійних ОЗТ показана нераціональність використання методу Ньютона. Для таких задач одним з найефективніших методів їх розв'язування є метод найшвидшого спуску.

Описані у розділі методи протестовані на різних тестових класах ОЗТ. Основні результати розрахунків представлені у вигляді: таблиць та графіків збіжності методів; графіків поверхонь, які є чисельними розв'язками поставлених ОЗТ; графіків помилок, які є розподілом значень квадратичного функціоналу (цільова функція).

Проте до викладеного матеріалу другого розділу є декілька зауважень:

1. Стор.50. п.п 2.2 Для розв'язку задач з обмеженнями (2.9 – 2.10) ; оскільки автор орієнтується на чисельні методи розв'язку, доцільно було б для оптимізації використати евристичні методи, наприклад, відомий метод гнучкого допуску. Метод дозволяє позбавитись обчислень похідних задач, отримати область оптимуму яка може бути областю глобального оптимуму за природою гнучкого допуску;
2. Умови щодо властивостей функцій для використання методів типу ньютонна (опуклість, існування гесіана) породжують умову існування одного екстремуму (глобального). Проте, можуть існувати початкові або крайові умови які не можуть бути представлені опуклими функціями. Ця обставина породжує звуження області застосування подібного підходу;

3. Про пошук глобального екстремуму можна не говорити, якщо зміна початкової точки істотно впливає на результат пошуку.

У третьому розділі проведено низку чисельних експериментів отриманих у другому розділі методів знаходження чисельного розв'язку лінійних та нелінійних ОЗТ. Розділ має виключно практичний зміст. Він містить тестування різних класів ОЗТ, зокрема, ОЗТ відновлення початкової умови (ПУ), ОЗТ відновлення граничної умови (ГУ), ОЗТ відновлення коефіцієнта теплопровідності.

Кожна з нелінійних тестових ОЗТ підтверджена різними чисельними результатами. Для цих задач наведено:

- графіки збіжності отриманих у розділі 2 трьох модифікацій класичного методу Ньютона;
- табличні результати динаміки збіжності третьої модифікації класичного методу Ньютона з нульовим наближенням до шуканого параметра;
- порівняльний аналіз кількості викликів функцій ПЗТ трьох модифікацій методу Ньютона;

Для цих задач наведено:

- графіки збіжності методу найшвидшого спуску з нульовим початковим наближенням до шуканих параметрів конкретної ОЗТ (ПУ, ГУ, коефіцієнт теплопровідності);
- порівняльний аналіз кількості викликів функцій ПЗТ методу найшвидшого спуску з класичним методом Ньютона з нульовим наближенням до шуканого параметра.;
- порівняльний аналіз кількості викликів функцій ПЗТ методу найшвидшого спуску з класичним методом Ньютона з наближенням до шуканого параметра у вигляді розкладу в ряд.

Слід зазначити, що отримані в дисертаційній роботі чисельні методи працюють досить ефективно з обчислювальної точки зору на різних класах лінійних та нелінійних ОЗТ. У найгіршому випадку кількість викликів процедури ПЗТ зменшується в 3 рази, а в найкращому – в 10 разів.

Змінний крок дає можливість отриманим методам бути стійкими при розв'язування подібних задач, а схема предиктор-коректор дає можливість уточнювати розв'язок конкретної поставленої задачі.

До матеріалів тестування, викладеним у розділі 3 є такі зауваження:

1. Рис.3.39 та 3.31 можна було б не наводити, оскільки вони не є інформативними;
2. Демонстрація ефективної роботи процедури оптимізації за рахунок вдалого вибору стартової точки не є інформативною, а є тривіальною. Уявімо, що за рахунок процедур пошуку стартової точки було знайдено один із локальних екстремумів. Очевидно, що цей екстремум і буде знайдено як глобальний.

У четвертому розділі описані прикладні математичні моделі протікання теплових процесів в об'єктах промисловості. Тестування отриманих у дисертаційній роботі методів проведено на цих моделях. Розділ також має практичний зміст. Перша математична модель – модель оптимізації температур

промислової муфельної печі. Друга математична модель – модель протікання теплообміну в системі з дзеркальними дифузійними поверхнями. Остання математична модель отримана та апробована автором при Інституті технічної теплофізики НАН України.

Моделювання оптимізації температур промислової печі – це прикладна задача, яка зводиться до розв'язування лінійних і нелінійних ОЗТ. Задача полягає у визначенні таких температур внутрішніх точкових нагрівачів, які вмонтовано в піч, щоб розподіл температури досліджуваного об'єкта печі був максимально близький до необхідного. У поставленій задачі цільовий функціонал є квадратичним функціоналом, який береться по області досліджуваного в печі об'єкта. Обмеження на квадратичний функціонал – це сам процес теплообміну (рівняння теплопровідності), який розглядається у всій області печі. Якщо будуть знайдені значення температур внутрішніх джерел тепла, то, розв'язавши відповідну ПЗТ (з відомими значеннями температур цих джерел тепла), отримуємо розподіл температури у всій печі (у тому числі, на досліджуваному в ній об'єкті). Це означає, що за отриманим розв'язком відповідної ПЗТ можна оцінити адекватність цих температур за цільовим квадратичним функціоналом.

Автором описано лінійні та нелінійні випадки. Лінійний випадок передбачає очевидний факт, що внутрішній розподіл температури у всій області в результаті дії внутрішніх джерел тепла печі є лінійною комбінацією температурних полів цих внутрішніх джерел тепла. У такому випадку автор показав, що задача зводиться до розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Тестування моделі проводилось на методах, описаних у другому розділі. Всі теплофізичні характеристики матеріалу були взяті з прикладного програмного пакету COMSOL Multiphysics. У ході моделювання автором розв'язувалась ОЗТ та відповідна їй ПЗТ для порівняння отриманих результатів.

Деякі зауваження до розділу:

1. Відносна помилка, наведена для першої задачі складає близько 3%. Тому демонстрація великої точності модифікованих методів (розділ 2) не є інформативною і доцільною.

До додатків дисертаційної роботи включено список публікацій здобувача за темою дисертації; відомості про апробацію результатів дисертації із зазначенням назв конференцій, місць і дат проведення; фрагменти програм у прикладному програмному пакеті MATLAB зі структурою розробленого програмного комплексу; інформацію про персональний комп'ютер та його фізичні характеристики; акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ДОСТОВІРНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Достовірність наукових результатів забезпечена розробленим комплексом програм, що дозволяє розв'язувати прикладні промислові задачі, які зводяться до розв'язування ОЗТ. Основні результати дисертаційної роботи використані в дослідженні процесу теплообміну у вимірjuвальній камері з радіаційним способом формування теплового потоку, у якій проводять калібрування засобів

вимірювання за допомогою оцінки однорідності розподілу поверхневої густини теплового потоку на тепло сприймальній поверхні випромінювача для відтворення одиниці вимірювання високої інтенсивності 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.

НАУКОВА НОВИЗНА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

З точки зору офіційного опонента на підставі комплексного аналізу відомих методів і засобів розв'язування основних класів ОЗТ найвагоміші наукові результати дисертаційної роботи такі:

- уперше запропоновано інтерполяційний метод знаходження мінімуму квадратичного функціонала в класичній постановці ОЗТ отриманими модифікаціями методу Ньютона в матриці Гессе, що привело до зменшення обчислювальних затрат на пошук розв'язку конкретної ОЗТ у 3–10 разів;
- уперше розроблено прикладну математичну модель протікання процесу теплообміну в замкненій системі з дифузійними поверхнями для вимірювання густини теплового потоку на поверхні тепловідводу з метою розробки вимірювального еталону та можливості здійснення калібрування сенсорів.
- удосконалено методи пошуку чисельного розв'язку різних класів багатовимірних ОЗТ модифікаціями класичного методу Ньютона. Отримані в роботі методи дають змогу отримати чисельні розв'язки основних класів ОЗТ з відносною похибкою розрахунків до $O(10^{-11})$;
- удосконалено метод побудови початкового наближення для ітераційного процесу знаходження глобального мінімуму квадратичного функціонала в класичній постановці багатовимірної (лінійної та нелінійної) ОЗТ за допомогою розкладу в ряди та методу лінеаризації, що дозволило отримати якісні наближення до шуканих параметрів різних класів ОЗТ.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані методи розв'язування ОЗТ дають змогу ефективно визначати невідомі параметри теплових фізичних процесів у твердих тілах, які математично описуються за допомогою обернених задач.

У роботі застосовані інтерполяційні методи для знаходження глобального мінімуму квадратичного функціонала в ОЗТ. У результаті застосування інтерполяційних методів зменшено кількість обчислень для пошуку розв'язку нелінійних ОЗТ відновлення початкової умови (ПУ), граничних умов (ГУ), температур внутрішніх джерел тепла та коефіцієнта температуропровідності. Інтерполяційні методи були використані для пошуку мішаних частинних похідних другого порядку в класичному методі Ньютона в процедурі мінімізації квадратичного функціонала ОЗТ. Крім того, використання змінного

кроку в класичному методі Ньютона та його модифікаціях, які отримані в роботі, дає змогу досить швидко отримати шуканий чисельний розв'язок ОЗТ з високою точністю. Запропоновані моделі ОЗТ дають змогу аналізувати роботу різних теплових процесів на підприємствах. Розроблена методика побудови початкового наближення у вигляді ряду Фур'є для знаходження розв'язку основних класів ОЗТ дає можливість отримати шуканий чисельний розв'язок задач у 3–10 разів швидше, ніж класична процедура пошуку розв'язку таких задач.

Розроблений автором комплекс програм дозволяє розв'язувати прикладні промислові задачі, що зводяться до розв'язування ОЗТ. Основні результати дисертаційної роботи використані в дослідженні процесу теплообміну у вимірjuвальній камері з радіаційним способом формування теплового потоку, у якій проводять калібрування засобів вимірювання за допомогою оцінки однорідності розподілу поверхневої густини теплового потоку на теплосприймальній поверхні випромінювача для відтворення одиниці вимірювання високої інтенсивності при Інституті технічної теплофізики НАН України.

ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

Основні наукові положення опубліковані в період з 2014 по 2018 роки.

Основний зміст дисертаційної роботи достатньо повно відображено у 16 наукових публікаціях. Із них 8 статей у науково-фахових виданнях і збірниках у галузі технічних наук України (з них: 2 статті – у виданнях, включених у міжнародні наукометричні бази; 1 стаття іноземною мовою, яка включена до міжнародної наукометричної бази Scopus); 8 тез доповідей – на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Конкретний особистий внесок здобувача в наукові роботи, які написані у співавторстві, відображений як в дисертації, так і в авторефераті.

Текст автореферату адекватно відображає зміст, структуру та основні положення дисертації.

ЗАУВАЖЕННЯ ДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ ТА АВТОРЕФЕРАТУ

1. Не приведено дані стосовно обґрунтування вибору методу пошуку екстремуму;
2. Умови щодо властивостей функцій для використання методів типу ньютонa (опуклість, існування гесіана) породжують умову існування єдиного екстремуму (глобального). Проте, можуть існувати початкові або крайові умови які не можуть бути представлені опуклими функціями. Ця обставина породжує звуження області застосування подібного підходу;
3. Характеристики процесу пошуку екстремуму такі як час ітерації, кількість звернень до цільової функції аналізуються у зв'язку зі

зменшенням часу пошуку екстремуму. Проте в цьому немає потреби у зв'язку з вимогами практики;

4. Точність методів оптимізації обмежується точністю інженерних методів розрахунку прийнятих для даної галузі, про що говорять результати наведені у розділі 4;
5. Про глобальність екстремуму можна не говорити, якщо зміна початкової точки істотно впливає на результат пошуку.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Не зважаючи на наведені зауваження, вважаю, що вони не знижують загальну позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Хайдурова В.В. «Методи та програмні засоби реалізації моделей основних класів обернених задач теплопровідності» є завершеною працею, містить висунуті здобувачем нові наукові положення, а також науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності вирішують актуальну науково-прикладну задачу, яка полягає в розробці швидкісних та модифікації існуючих методів розв'язування різних класів лінійних та нелінійних багатовимірних ОЗТ.

Робота характеризується єдністю змісту й свідчить про особистий внесок здобувача в науку.

Мета роботи, поставлені та розв'язані в ній завдання, викладені основні наукові результати дозволяють зробити висновок про те, що дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а також відповідає профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи Хайдурова В.В. «Методи та програмні засоби реалізації моделей основних класів обернених задач теплопровідності» можна зробити висновок про те, що за актуальністю, науковим рівнем, отриманими науковими результатами та практичною цінністю вона відповідає пп. 9, 10, 12, 13 «Постанови КМ від 24.07.2013 № 567» (зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-математичних основ гірничого транспорту Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України

Г.І. Ларіонов

Підпис засвідчую

В.о. вченого секретаря Інституту

к.т.н. Санунова

Г.О.



Г.І. Ларіонов