

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Кобильської Олени Борисівни
«Математичне та комп’ютерне моделювання теплових процесів у складних
системах з рухомими та нерухомими осесиметричними елементами», поданої
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
01.05.02 –математичне моделювання та обчислювальні методи.

Дисертаційна робота Кобильської Олени Борисівни присвячена дослідженню теплових процесів в складних системах, таких як прокатні стани, електричні машини.

Основна мета дисертаційного дослідження – підвищення ефективності контролю температури у складних технологічних процесах металургії (прокатка, термічна обробка), електромеханіки, де мають місце складні умови теплообміну між багатошаровими рухомими та нерухомими елементами на граничних поверхнях, за рахунок побудови нових та удосконалення існуючих математичних моделей процесів теплообміну, розробки ефективних методів розв’язання краєвих, нелокальних та обернених задач для визначення основних параметрів керування температурними полями.

I. Актуальність теми дисертації

У промисловості існує багато технологічних процесів, у яких важливу роль відіграє теплообмін у складних системах. Такими системами у металургії є прокатні стани, обладнання для 3-D друку та термічної обробки металів, у електромеханіці – електричні машини, у яких під дією струму виділяється тепло та відбувається теплообмін між обмотками.

Процес побудови адекватних моделей теплових процесів, які відбуваються в складних системах, надає широкі можливості для вивчення властивостей систем і принципів теплообміну з навколишнім середовищем. У більшості випадків вимірювання та контроль температури у складній

системі, з різних причин, проводити складно або взагалі неможливо. Керування процесами теплообміну тут відбувається або на основі експерименту, або на основі розв'язання обернених задач для рівняння теплопровідності, що розглядаються в рамках математичних моделей теплових процесів у складних системах. У зв'язку з цим важливе значення має побудова адекватних математичних моделей та знаходження розв'язків обернених задач, які дозволяють визначати параметри керування процесом теплообміну в системі. Обернені задачі дозволяють ефективно визначати необхідні параметри керування температурними розподілами.

Незважаючи на значну кількість досліджень, на сьогодні відкритою залишається проблема визначення параметрів керування температурними процесами на основі математичних моделей, які з достатньою точністю відображають температурні розподіли та дозволяють керувати ними.

Виникає необхідність у модифікації та узагальненні існуючих математичних моделей температурних розподілів у рухомих елементах та системах з різними умовами теплообміну поверхні з навколишнім середовищем, складних з геометричної точки зору багатошарових областях, а також у розробці нових методів розв'язання нелінійних краївих та нелокальних задач, що пов'язані з такими моделями, ефективних алгоритмів розв'язання прямих та обернених задач та визначення параметрів керування процесами теплообміну.

В роботі Кобильської Олени Борисівни набувають подального розвитку математичні моделі процесів теплообміну на основі початково-краївих та нелокальних задач для рівняння теплопровідності за рахунок застосування інтегральних і складних граничних умов спряження імпедансного типу у багатошарових областях та складних системах. Обґрутується необхідність застосування методів теорії інтегральних та диференціальних рівнянь до розв'язання краївих та нелокальних задач в областях, що мають складну геометричну форму.

Тому можна зробити висновок про те, що тема дисертаційної роботи Кобильської О.Б. є актуальною та має важливе наукове і практичне значення. В дисертації розвивається новий науковий напрям у математичному моделюванні процесів теплообміну у складних системах на основі нелінійних краївих та нелокальних задач зі складними умовами теплообміну на граничних поверхнях.

II. *Оцінка структури, обсягу та змісту роботи.* Робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (300 найменувань на 31 сторінці) та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 316 сторінок, в тому числі 265 сторінок основного тексту, включаючи 9 таблиць та 58 рисунків; обсяг додатків 12 сторінок.

Автореферат і публікації автора повністю розкривають основний зміст дисертації.

Вступ містить загальну характеристику роботи, актуальність проблеми, мету та завдання дослідження, відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, відзначені наукова новизна й практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача в роботах у співавторстві, відомості про апробацію результатів роботи.

У першому розділі розглянуто існуючі фізичні та математичні моделі теплових процесів у складних системах, які включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи осесиметричної форми, що нагріваються або охолоджуються зовнішніми або внутрішніми джерелами тепла і враховують залежність температурного поля від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з навколишнім середовищем. Наведено стислий огляд публікацій за темою дисертації, зроблено аналіз існуючих числових та аналітичних методів розв'язання нелінійних краївих та нелокальних задач, сформульовано задачі дисертаційного дослідження.

В результаті дослідження відомих математичних моделей, побудованих на основі початково-крайових, крайових та нелокальних задач для диференціального рівняння тепlopровідності, окреслюється проблема щодо необхідності побудови математичних моделей теплових процесів у складних системах, що мають складну геометричну форму, наприклад у прокатних станах, багатошарових виробах складної геометричної форми, в електричних машинах. Обґрутується доцільність розробки нових математичних моделей для розрахунків температурних розподілів у таких системах та їх конструктивних елементах. Крім того, виявлено недоліки методів числових розрахунків температурних розподілів у раніше запропонованих математичних моделях. Зокрема, зазначено, що раніше запропоновані математичні моделі теплових процесів, які побудовано на основі не пов'язаних між собою лінійних крайових задач для рівнянь тепlopровідності, не враховують тепловий контакт на межі різних частин складної системи; теплообмін між складною системою і зовнішнім або охолоджуючим середовищем; геометрію частин складної області, кускову-монотонність функцій коефіцієнтів рівняння. Ці моделі, здебільшого призначені для дослідження теплового процесу в окремих частинах складної області, що значно ускладнюють аналіз теплового процесу в складному багатошаровому виробі, такому як, наприклад, електрична машина. Пропонуються концептуально нові та уточнюються існуючі математичні моделі теплових процесів у складних системах – елементах електричних машин, валкових кристалізаторах та в елементах складних систем під час таких технологічних операцій як термоциклічна обробка (ТЦО) та електропластичне волочіння (ЕПВ) у вигляді крайових, початково-крайових та нелокальних задач для рівняння тепlopровідності.

В розділі обґрутовано необхідність побудови математичних моделей теплових процесів у стрічці та дроті під час електропластичної та термоциклічної обробки виробів внутрішніми та зовнішніми джерелами

тепла, а також постановки обернених задач на основі математичних моделей, що дозволяють визначати параметри керування температурними полями.

Зазначено, що введення нелокальної інтегральної умови, яка визначає баланс тепла області нагрівання або охолодження, у крайову задачу для рівняння теплопровідності дозволяє більш точно формулювати математичні моделі теплових процесів, зокрема, керуючи параметрами теплового процесу, підтримувати необхідну температуру в усіх точках області, що нагрівається.

У другому розділі розглянуто математичні моделі теплообміну у вигляді нелокальних задач для рівняння теплопровідності, запропоновано метод розв'язання задачі керування тепловим процесом, що відбувається у осесиметричних елементах складних систем. Це дає змогу підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

Досліжується зв'язок нелокальної та крайової задачі, що описують один і той же фізичний процес нагрівання та обґрунтуються переваги застосування однієї з них по відношенню до іншої для описання того чи іншого класу теплового процесу. Такі задачі виникають при дослідженні температурних розподілів під час відпалу рухомого дроту та стрічки постійними або періодично діючими внутрішніми та зовнішніми джерелами тепла. Проведені чисельні експерименти та побудовані температурні розподіли в умовах дії внутрішніх та зовнішніх джерел тепла, які підтверджують ефективність застосування нелокальних умов для описання теплових процесів. Це дозволяє визначати параметри керування процесом тепло і массопереносу, зокрема визначати джерела тепла та концентрації речовини.

Запропоновано метод розв'язання оберненої нелокальної задачі, що описує температурне поле у зоні нагрівання рухомого середовища внутрішніми джерелами тепла. Шляхом уведення до математичної моделі теплового процесу, який протікає в рухомій циліндричній області інтегральної умови визначено параметри керування температурним полем.

Інтегральна умова побудована виходячи із фізичних міркувань протікання процесу, що дозволило підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

У третьому розділі розглядаються математичні моделі теплових процесів, що відбуваються в рухомих осесиметричних елементах складних систем, таких, як пристрой для термічної обробки, де діють імпульсні джерела тепла.

Зокрема, розглядаються теплові процеси під час термічної обробки металів і сплавів, в якій використовується циклічна багаторазова зміна температури.

Так, в останні роки інтенсивно розробляються і знаходяться на стадії впровадження принципово нові методи термообробки – термоциклічна обробка (ТЦО) та електропластичне волочіння (ЕПВ), режими яких характеризуються (на відміну від відомого методу термічної обробки) багаторазовим нагріванням та охолодженням з оптимальними швидкостями і відсутністю витягів за максимальних температур нагрівання.

Для з'ясування впливу термічної складової імпульсного струму на електропластичну деформацію було побудовано математичну модель температурного поля в зоні підведення струму.

З математичної точки зору температурне поле рухомого осесиметричного елемента – дроту під час процесу ЕПВ можна розглядати як температурне поле рухомого осесиметричного ізотропного середовища з імпульсними внутрішніми джерелами тепла, що породжуються дією електричного струму силою $I(t)$ в зоні нагрівання.

На основі цих моделей запропоновано формулювання обернених задач для однорідних та неоднорідних рівнянь тепlopровідності. Обернені задачі спрямовані на знаходження параметрів керування температурним полем елементів складних систем за допомогою математичної моделі. Ці параметри дозволяють підтримувати необхідний температурний розподіл у всій системі чи в її окремих елементах. Досліджуються особливості дії джерел тепла на

температурний розподіл. Запропоновано методи розв'язання обернених задач тепlopровідності з імпульсними періодично діючими джерелами тепла.

Для перевірки адекватності запропонованої моделі були проведені порівняння числових розрахунків з результатами експериментальних замірів температури в контрольних точках на поверхні заготовок. Відносна похибка розрахунків склала близько 5%.

Також у розділі розглядається математична модель температурного та напруженого стану рухомого ізотропного осесиметричного середовища з періодично діючим імпульсним джерелом тепла. Математична модель у вигляді системи краївих задач для диференціальних рівнянь тепlopровідності і термопружності описує процеси, що відбуваються у тонкому рухомому дроті під час електропластичної деформації. Вивчаються особливості впливу імпульсних джерел тепла на температурний розподіл та розподіл напружень і переміщень. Досліджуються особливості температурних розподілів в зразках під час пропускання імпульсів струму. Отримано числові розрахунки для цинку, міді та неметалевих сплавів, побудовано графіки температурних розподілів та розподілів напружень і переміщень під час електропластичної деформації.

У четвертому розділі розглянуто математичні та фізичні моделі теплових процесів у складних системах, що включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та нещільному контакті шарів осесиметричної форми. Побудовано умови імпедансного типу на границі шарів складної системи – валкового кристалізатора. У математичній моделі враховані різні умови теплообміну внутрішньої та зовнішньої поверхонь валка зі стрічкою та навколошнім середовищем. Запропоновано метод розв'язання задач, що описують побудовані моделі.

Побудовано фізичну модель теплового процесу у валковому калібрі під час прокатки стрічки на двовалковому прокатному стані. Запропоновано математичну модель температурного поля рухомого порожнистого валка прокатного стану циліндричної форми, що обертається навколо своєї осі зі

сталою кутовою швидкістю. Уточнення математичної моделі полягає у врахуванні того, що зовнішня поверхня, залежно від кута φ повороту валка прокатного стану навколо своєї осі, сприймає тепло від стрічки, що деформується, а потім втрачає його за межами зони деформації за законами Ньютона та Стефана-Больцмана. Внутрішня його поверхня втрачає тепло конвективним або кондуктивним способом, у окремих випадках – ще і випромінюванням. У зоні контакту валка зі стрічкою тепло від поверхні передається до його осі теплопровідністю. В іншій частині валка тепло втрачається випромінюванням, конвективним або кондуктивним способом. Теплову взаємодію валка зі стрічкою, що обробляється, дозволяє враховувати умова спряження (границя умова четвертого роду), вважається, що температури поверхні валка і стрічки у зоні деформації однакові, і якщо основи циліндричного валка теплоізольовані, а його температура не суттєво залежить від осьової координати, то можна покласти $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Задачу визначення температурного розподілу на поверхні і у тілі валка зведено до задачі визначення температурного розподілу осьового перерізу порожнистої циліндра $T = T(r, \varphi, t)$, що обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω . Задачу визначення квазістаціонарного температурного поля зведено до розв'язання еквівалентного їй інтегрального рівняння типу Гаммерштейна з ядром у вигляді функції Гріна. Розв'язок інтегрального рівняння знайдено із застосуванням модифікованого методу Ньютона. За допомогою системи комп'ютерної математики Mathcad побудовано температурний розподіл поверхні валка. Розроблено алгоритм розв'язання неоднорідної задачі та за допомогою GUI-додатка PDEToolbox Matlab, побудовано температурний розподіл поверхні валка.

Розглянуто математичні моделі теплообміну з умовами імпедансного типу у багатошарових областях. Побудована математична модель температурного розподілу процесу гарячого спікання виробів у двошаровому контейнері циліндричної форми. Для визначення температурного розподілу у

внутрішньому циліндрі отримана гранична умова імпедансного типу. Запропонована математична модель та алгоритми розв'язку задачі з достатньою точністю описують процес спікання виробів у контейнері. Проведені числові розрахунки та побудовані температурні розподіли під час спікання виробів із спресованого порошкового заліза.

Побудована математична модель температурного поля полімерної нитки – філамента, що розігрівається в екструдері 3-D принтера згідно технології FDM (fused deposition modeling) просторового друку. Розплавлена полімерна нитка видавлюється на нагріту поверхню з поступовим нашаруванням матеріалу один на один, створюючи готову деталь. Математична модель температурного поля складної системи: екструдер, нагрівник, полімерна нитка, що рухається через екструдер з постійною швидкістю, розглядається у вигляді крайової задачі для рівняння тепlopровідності з додаванням відповідних крайових умов. Філамент розігрівається в обмеженій області зовнішніми джерелами тепла конвективним або кондуктивним способом до температури плавлення філамента на виході із зони нагрівання екструдера.

У п'ятому розділі побудовано математичні моделі теплових процесів, що протікають у складних системах (електричних машинах), які на відміну від існуючих математичних моделей враховують **характер теплового обміну на межі розділу шарів** та дозволяють розраховувати температуру окремих частин складної області. Запропонований метод розв'язання крайових задач для рівняння тепlopровідності у складній системі з осесиметричними елементами – багатошаровому циліндрі, де в одній частині елементів діють внутрішні джерела тепла, а у іншій – зовнішні. Розглянуто метод розв'язання задачі в умовах невизначеності однієї з граничних умов на межі шарів з кондуктивним теплообміном між шарами.

Вперше сформульовано єдиний підхід, що дозволив побудувати нові та удосконалити існуючі математичні моделі теплових процесів у складних системах, що включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи

при щільному та нещільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються або охолоджуються, який відрізняється від аналогічних підходів врахуванням залежності температурного поля елементів від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з навколишнім середовищем.

Запропоновано континуальний підхід до дослідження температурних розподілів у складній електромеханічній системі, якою є електрична машина. Побудовані математичні моделі теплового процесу та запропоновані методи розв'язання краївих задач в складній електромеханічній системі. Розв'язана краївська задача для неоднорідного рівняння тепlopровідності у складній циліндричній області, яка утворена при перетині трьох циліндрів, два з яких кругові, а третій з основою $2n$ «пелюсткової троянди», що мають, у циліндричній системі координат, спільну вісь симетрії. Запропоновано алгоритм розв'язання сформульованої задачі. Проведені числові розрахунки розв'язання задачі та побудовані графіки температурних розподілів.

III. Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове рішення важливої науково-прикладної проблеми, що полягає у розробці та узагальненні математичних та комп'ютерних моделей процесів теплообміну у складних системах.

У межах запропонованого напряму на основі сформульованих принципів побудови нових та удосконалення існуючих математичних моделей та методів розв'язання задач одержано такі наукові результати, що дозволяють підвищити точність числових розрахунків та ефективність контролю температури у складних системах.

Вперше:

- сформульовано єдиний підхід, що дозволив побудувати нові та удосконалити існуючі математичні моделі теплових процесів у складних системах, що включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи

при щільному та нещільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються або охолоджуються, який відрізняється від аналогічних підходів врахуванням залежності температурного поля елементів від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з навколишнім середовищем;

- запропоновано метод розв'язання краївих задач для рівняння тепlopровідності у складній області – багатошаровому циліндрі, де в одній частині шарів діють внутрішні джерела тепла, а в іншій – зовнішні, який полягає в усереднені температурних розподілів за радіусом у внутрішніх шарах, в умовах невизначеності однієї з граничних умов на межі шарів, та зведені країової задачі до задачі з умовами імпедансного типу.

Удосконалено:

- математичні моделі теплових процесів, що відбуваються у складних багатошарових областях при щільному та нещільному kontaktі шарів які, на відміну від існуючих, враховують різні закони теплообміну на межі розділу шарів, що залежать від кута повороту елемента навколо своєї осі і дозволяють розраховувати температуру окремих елементів виробів;
- методи розв'язання обернених краївих задач тепlopровідності які, на відміну від існуючих, враховують змінні граничні умови, застосовують інтегральну умову балансу тепла для побудови розв'язку, що дає можливість розширити коло застосувань методів розв'язання обернених задач;
- математичні моделі процесів теплообміну у вигляді нелокальних задач для рівняння тепlopровідності, які, на відміну від існуючих, за рахунок застосування інтегральної умови в математичну модель дозволяють визначити параметри керування температурними розподілами;
- математичні моделі теплообміну між елементами складних систем, де, на відміну від існуючих математичних моделей у вигляді нелокальних задач, як нелокальна умова запропонована умова балансу тепла.

IV. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні ряду математичних моделей та програмних модулів, що мають можливість адаптації до дослідження різних складних систем та можливість використання в системах керування процесами виготовлення дроту. Розроблені методи і засоби розв'язання задач були використані під час розробки технологічного обладнання процесів спікання, гарячого пресування та високотемпературної деформації виробів канонічної та неканонічної форми із порошкових матеріалів (Акт впровадження фірма “Карма” Додаток Б), для прогнозування перебігу пожежі і розрахунків температур в складних системах (Акт впровадження фірма “Neutronic” Додаток Б).

Крім того, математичні моделі, методи, алгоритми, відповідне програмне забезпечення, що запропоновано в дисертаційній роботі, використані в наукових дослідженнях, які проводяться відповідно до планів науково-дослідних робіт в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського під час виконання держбюджетних та госпрозрахункових тем.

Розроблені моделі відрізняються від існуючих більш високим ступенем адекватності, що дало змогу підвищити точність визначення температурних розподілів під час технологічних операцій у металургії, адитивному виробництві та під час роботи електричних машин різного типу.

Отримані результати (математичні моделі, методи розв'язання задач) використані у викладанні курсів «Обчислювальні методи», «Рівняння з частинними похідними», «Рівняння математичної фізики», «Моделювання природничих та технологічних процесів» та інших у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (Додаток Б).

IV. Повнота викладення наукових положень та висновки

За результатами досліджень опубліковано 59 наукових праць: з них 3 закордонні колективні монографії, 11 включені до міжнародних наукометрических баз SCOPUS та Web of Science, 21 стаття

у фахових виданнях України, 35 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових виданнях.

V. Зauważення до дисертації

1. В авторефераті “Після застосування усереднення та подальших перетворень задача (12) – (15) трансформується у...”(стор. 16). На наш погляд, авторка недостатньо обґрунтувала із яких міркувань проводиться усереднення і за якою координатою.

2. В підрозділі 4.5 представлено декілька моделей теплових процесів, але в чому полягає відмінність цих процесів і відповідних моделей недостатньо описано.

3. Зустрічаються надто категоричні (що претендують на роль всезагальності) висловлення, як наприклад, на стор. 31 (після формулі (1.18)): «Ми отримали найбільш повне рівняння тепlopровідності, що описує процеси теплообміну на макрорівні в інтегральній та дивергентній формах» (як це розуміти?). До речі, після даного речення слідує висловлення уже надто «приземистого» (навчального) характеру: «Якщо в формулі (1.18) параметри не є залежними від u , то дана формула матиме... простіший вигляд».

4. В 4 розділі представлена модель температурного розподілу процесу гарячого спікання виробів у циліндричному контейнері, проте відсутній чисельний експеримент і результати натурного експерименту.

5. Недостатньо описана(на наш погляд) відмінність методів розв'язання обернених задач тепlopровідності, що представлені в розділі 2 і розділі 3. Також авторка дещо поверхово визначає в роботі клас задач, для яких можна застосовувати описаний у розділі 3 метод (граничні, коефіцієнтні обернені задачі; залежність невідомої функції від часу, температури, координати тощо).

Загальний висновок.

Дисертаційна робота «Математичне та комп’ютерне моделювання теплових процесів у складних системах з рухомими та нерухомими осесиметричними елементами» є актуальною, самостійною, завершеною науковою працею, висновки і результати якої мають наукову новизну і практичне значення.

У дисертації на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове рішення важливої науково-прикладної проблеми, яке полягає в розробці нових та удосконалених існуючих математичних моделей температурних розподілів у складних системах та методів їх дослідження. Такі складні системи включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи циліндричної форми, що нагріваються зовнішніми чи внутрішніми джерелами тепла або охолоджуються, та які враховують залежність температурного поля від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з оточуючим середовищем. Отримане рішення відрізняється від існуючих рішень більш повним відображенням процесів теплообміну, розробкою нових обчислювальних методів розв’язання початково-крайових та нелокальних задач, які виникають у математичних моделях, що дозволяє підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

Роботу виконано на високому науковому рівні. Дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки) і профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01.

В цілому дисертація відповідає пп. 9, 10, 12–14 «Порядку присудження наукових ступенів», затверженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015, №567 від 27.07.2016) щодо докторських дисертацій, а її авторка Кобильська Олена Борисівна заслуговує

присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп’ютерних наук та
прикладної математики
Національного університету
водного господарства та
природокористування
/А.Я.Бомба/

