

## 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.

**Актуальність обраної теми дисертаційної роботи.** У промисловості існує багато технологічних процесів у яких важливу роль відіграє теплообмін у складних системах. Такими системами у металургії є прокатні стани, обладнання для термічної обробки металів, та технології 3-Д друку; у електроенергетиці – електричні машини, у яких під дією струму виділяється тепло та відбувається теплообмін між обмотками. Однією з важливих проблем, що тут виникають є розробка математичних моделей та методів аналізу температурних розподілів.

У більшості випадків вимірювання та контроль температури у таких системах, з різних причин, проводити складно або взагалі неможливо. Керування процесами теплообміну тут відбувається на основі натурного експерименту, або на основі розв’язків обернених задач для рівняння тепlopровідності, що виникають у математичних моделях. 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.

Існуючі наукові досягнення в області математичного моделювання процесів теплообміну здебільшого базуються на краївих задачах для рівняння тепlopровідності, значно рідше у моделях використовуються нелокальні задачі. Для обернених задач на основі засобів комп’ютерного моделювання розроблено та активно використовується чимало методів керування параметрами температурних розподілів.

За допомогою краївих та нелокальних задач відбувається ідентифікація того чи іншого температурного розподілу. Слід відзначити, що математичні моделі на основі краївих задач досить правдиво відображають температурні розподіли усередині області нагрівання і не зовсім вірно відображають їх на границях. Це пов’язано з особливістю побудови математичної моделі. Підвищення ефективності і ідентифікації процесів теплообміну та контролю температурних розподілів вимагає побудови більш досконалих математичних моделей та ефективних обчислювальних методів розв’язку задач, що у них виникають. Нелокальні інтегральні умови виникають при вивченні процесів

теплообміну в разі, наприклад, коли границя області, де відбувається теплообмін недоступна для безпосереднього вимірювання температури. Проте можливості застосування нелокальних задач, інтегральних умов та більш складних умов імпедансного типу у математичних моделях теплообміну у рухомих елементах та системах досліджені недостатньо. Формулювання нелокальних умов на основі уявлення про процес теплообміну є досить складною процедурою.

В роботі узагальнюється теорія побудови математичних моделей процесів теплообміну у складних системах на основі початково-крайових та нелокальних задач для рівняння тепlopровідності за рахунок застосування інтегральних і складних граничних умов спряження імпедансного типу у багатошарових областях та на граничних поверхнях елементів складних систем, пропонуються математичні моделі у вигляді нелокальних та крайових задач тепlopровідності з кусково-монотонними функціями. Обґрутується необхідність застосування методів теорії інтегральних та диференціальних рівнянь до розв'язання крайових та нелокальних задач в областях, що мають складну геометричну форму.

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

Це також підтверджується тим, що робота виконана автором на кафедрі інформатики і вищої математики КрНУ як складова частина бюджетних та госпрозрахункових договорів, що проводились протягом 2012–2020 років, зокрема держбюджетний договір № 41Д(20-21)ЕМА-ІВМ-ГМ, госпрозрахункові договори № 241/12 – IBM – Neutronic, № 260/12 – IBM – Neutronic 2, № 280/13 – IBM – Neutronic 3, № 292/13 – IBM – Neutronic 4 з фірмою NEUTRONIC (Франція), проект «Нелокальні задачі у математичних моделях» (Розпорядження Президента України №1039/2014-рп Про призначення грантів Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених на 2014 рік).

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Зміст дисертаційної роботи та наукових публікацій Кобильської О. Б. засвідчують достатню обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів. Обґрунтованість і достовірність результатів, отриманих у дисертаційній роботі, базується на використанні методів математичного моделювання та апарату математичної фізики,

забезпечується чисельними експериментами, відповідністю моделей, технологічним і фізичним процесам, результатами досліджень інших авторів та результатами натурних експериментів, актами впровадження. Обґрунтованість наукових положень, результатів та висновків дисертації забезпечується також їх апробацією на наукових конференціях, симпозіумах і семінарах, опублікуванням 3 колективних монографій, 21 статті у наукових фахових виданнях з технічних наук, а також тим, що 11 публікацій включені до міжнародних наукометрических баз SCOPUS та Web of Science.

**Наукова новизна результатів дисертації.** У межах запропонованого напряму на основі сформованих принципів побудови нових та удосконалення існуючих математичних моделей та обчислювальних методів розв'язання задач одержано наступні наукові результати.

**Вперше:**

- сформульовано єдиний підхід до побудови нових та удосконалення існуючих математичних моделей теплових процесів у складних системах, що включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному 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 оточуючим середовищем, що дозволяє підвищити ефективність контролю температури в складних системах та їх елементах;
- запропоновано метод розв'язання краївих задач для рівняння тепlopровідності у складній області – багатошаровому циліндрі, де в одній частині шарів діють внутрішні джерела тепла, а у іншій – зовнішні, який, за рахунок усереднення температурних розподілів за радіусом у внутрішніх шарах в умовах невизначеності однієї з граничних умов на межі шарів, за допомогою введення умов імпедансного типу дозволяє підвищити точність чисельних розрахунків та ефективність контролю температури в складних системах;

**Удосконалено:**

- математичні моделі теплових процесів, що відбуваються у складних багатошарових областях при щільному та не щільному kontaktі шарів які, на відміну від існуючих, враховують різні закони теплообміну на межі розділу шарів, що залежать від кута повороту елементу навколо своєї осі і дозволяють розраховувати температуру окремих елементів виробів, що сприяє підвищенню ефективності контролю температури в складних системах;
- методи розв'язку 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, що в свою чергу дозволило підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

### **Набули подальшого розвитку:**

- 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, що дає змогу підвищити ефективність контролю температури в складних системах;
- теорія нелокальних задач у математичних моделях теплообміну між елементами складних систем де, на відміну від існуючих постановок нелокальних задач, в якості нелокальної інтегральної умови запропонована умова балансу тепла, що дає можливість підвищити ефективність контролю температури у складних системах.

**Наукове, практичне значення та реалізація результатів роботи.** Запропоновані в роботі математичні моделі, обчислювальні методи, комп’ютерні засоби моделювання дозволяють розв’язувати задачі, що виникають в практичній діяльності.

Результати, отримані в дисертаційному дослідженні, впроваджені у вигляді математичних моделей, методів, алгоритмів, методик, розроблених систем керування тепловими процесами, про що свідчать акти впровадження.

Отримані в процесі досліджень теоретичні положення можуть бути використані у подальшому як при поглибленному вивчення теорії математичних моделей, нелокальних задач, кінцево-різницевих методів, так і в практичній діяльності при побудові систем керування процесами нагріву рухомих та нерухомих виробів з діючими внутрішніми та зовнішніми джерелами тепла, аналізу температурних розподілів виробів складної форми.

Наукові положення, висновки, пропозиції та рекомендації, а також результати розрахункових і експериментальних досліджень, що містяться в дисертаційній роботі, використані на підприємствах: «Neutronic»( акт від 12 вереня 2019 р.) (Франція), ТОВ НВФ «Карма» (акт від 13 травня 2020 р.).

Отримані результати використані при викладанні курсів «Чисельні методи», «Рівняння з частинними похідними», «Рівняння математичної фізики», «Моделювання природничих та технологічних процесів» та інших у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (акт від 20.02.2020 р. та 15.06.2018 р.).

**Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.** За результатами дослідень 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.

Дисертаційна робота пройшла апробацію на 27 міжнародних, всеукраїнських та регіональних конференціях: міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання в наукових технологіях» КМНТ (м. Харків, 2014, 2016, 2018); міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій» (Рівне, 2018); Всеукраїнській науковій конференції «Математичне моделювання та математична фізика» (м. Кременчук, 2013, 2015, 2017); міжнародних симпозіумах «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики» (Харків-Херсон, 2011, 2013, 2017); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 2016); міжнародних наукових конференціях International Conference on Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (Albena (Bulgaria), 2014-2019); Всеросійській конференції «Необратимые процессы в природе и технике», (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015); міжнародній науковій конференції “37 International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics, MIPRO 2014” (Opatija (Croatia), 2014); XIV, XV міжнародних наукових конференціях “International PHD WorkShop OWD 2013” (Wisla (Poland) 2012, 2013); міжнародній науковій конференції «Электрон-фононные и спиновые взаимодействия, инициированные быстрыми заряженными частицами, электромагнитными полями, электрическими токами и СВЧ-излучением в макроскопических проявлениях на обычных наноматериалах» (Туапсе, 2012); конференції «Обчислювальна та прикладна математика» (Київ, 2012); 51-й міжнародній науковій конференції «Актуальные проблемы прочности» (Харків, 2011), міжнародних конференціях International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (Кременчук, 2017, 2019).

Аналіз публікацій автора дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації нашли повне відображення в авторефераті та наукових фахових виданнях. Автореферат дисертації повною мірою відображає зміст роботи та отримані автором результати досліджень. Робота пройшла необхідну апробацію на наукових семінарах та конференціях.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності у цілому.** Дисертаційна робота містить вступ, п'ять розділів, висновки та додатки.

**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, наведено стислий огляд публікацій за темою дисертації.

Розглядається теплообмін у складних системах, що відбувається під час таких видів обробки як термоциклічна (ТЦО), електропластичне волочіння (ЕПВ), окреслена проблема визначення температурного поля під час ТЦО і ЕПВ, вирішення якої стає можливим завдяки побудові адекватних математичних моделей.

Розглядається методи дослідження теплових процесів в електричній машині. Моделювання теплових процесів в електричній машині передбачає розгляд електричної машини як складної теплової системи – багатошарової області з різними теплофізичними характеристиками шарів, в якій деякі шари області в розрізі мають вигляд криволінійної трапеції.

Аналіз нелокальних задач показав, що достатньо добре вивчені питання існування і єдності, розв'язності нелокальних задач з інтегральними умовами, проте їх можливості, зокрема застосування інтегральних умов в обернених задачах як додаткової інформації або для побудови функціоналу якості вивчені недостатньо. В цих роботах не показана ефективність застосування нелокальних задач у якості математичних моделей.

Формулюються задачі дисертаційного дослідження.

**У другому розділі** побудовані математичні моделі теплових процесів, що відбуваються в осесиметричних елементах складних систем під дією зовнішніх та внутрішніх джерел тепла. Запропоновані нелокальні інтегральні умови, що з фізичної точки зору виражають баланс енергії в області нагрівання. В залежності від характеру джерел тепла енергія може виділятися всередині області або підводиться до неї із зовні. Це відображене під час постановки нелокальної задачі. Розглянуті постановки задач керування джерелом тепла та граничним режимом. Зокрема розглянуті:

- нестационарна задача керування тепловим процесом в області із внутрішніми джерелами;

- задача керування тепловим процесом із зовнішніми джерелами тепла в стаціонарних умовах;
- задача керування нестаціонарним тепловим процесом із зовнішніми джерелами.

Побудовані температурні розподіли в області нагрівання, що отримані із розв'язків крайової, нелокальної задачі та температурні розподіли отримані експериментально. Проведено порівняльний аналіз температурних розподілів. Зроблено висновок, що уведення нелокальної інтегральної умови балансу тепла у крайову задачу для рівняння тепlopровідності, дозволяє більш точно формулювати математичні моделі процесів теплообміну, зокрема керуючи параметрами теплового процесу підтримувати необхідну температуру в усіх точках області, що нагрівається. Розв'язки нелокальних задач добре узгоджуються з експериментальними даними.

Запропоновано метод розв'язання задачі керування тепловим процесом, що відбувається у осесиметричних елементах складних систем. Шляхом уведення до математичної моделі теплового процесу, який протикає у рухомому осесиметричному елементі інтегральної умови визначено параметри керування температурним полем. Інтегральна умова побудована виходячи із фізичних міркувань протікання процесу, що дозволило підвищити ефективність аналізу температури в складних системах.

У третьому розділі розглядаються математичні моделі процесів теплообміну, що відбуваються в рухомих осесиметричних елементах складних систем, таких як пристрой для термічної обробки, де діють імпульсні джерела тепла. На основі цих моделей запропоновано формулування 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 окремих елементах системи. Для кожного випадку (внутрішнього, зовнішнього джерела тепла або їх комбінації) пропонується відповідний метод розв'язання оберненої задачі (відновлення джерела тепла). Показано, що задача знаходження температурного поля і розподілу концентрації як внутрішнього, так і зовнішнього джерела тепла може бути зведена до екстремальної постановки. Інтегральна умова балансу енергії, використовується для побудови квадратичного функціоналу нев'язки в екстремальній задачі. Для пошуку невідомої функції (керування) джерела використовується метод спряжених градієнтів.

Побудована а математична модель теплового процесу у випадку, коли ми маємо комбінацію внутрішніх і зовнішніх періодично діючих джерел тепла.

Розглянута обернена задача з невідомою функцією джерела. Для знаходження функції джерела використовується модифікований метод мінімізації нев'язок, а інтегральна умова балансу тепла виступає додатковою умовою і використовується для уточнення шуканої функції джерела.

Досліджуються та враховуються особливості впливу імпульсних джерел тепла на температурний розподіл.

**В четвертому розділі** розглянуто математичні та фізичні моделі теплових процесів у складних системах, що включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному контакті шарів осесиметричної форми. Побудована фізична модель теплового процесу у валковому калібрі під час прокатки стрічки на двохвалковому прокатному стані. Запропонована математична модель температурного поля рухомого порожнистого валка прокатного стану циліндричної форми, що обертається навколо своєї осі зі сталою кутовою швидкістю. У математичній моделі враховані різні умови теплообміну внутрішньої та зовнішньої поверхні валка зі стрічкою та оточуючим його середовищем. Запропоновано метод розв'язання задачі. Уточнення математичної моделі полягає у врахуванні того, що зовнішня поверхня, у залежності від кута  $\varphi$  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 тепlopровідністю. У іншій частині валка тепло втрачається випромінюванням, конвективним або кондуктивним способом. Теплову взаємодію валка зі стрічкою, що обробляється, дозволяє враховувати умова спряження (гранична умова четвертого роду). Побудовані умови імпедансного типу на границі шарів складної системи – валкового кристалізатора.

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.

**В п'ятому розділі** побудовані математичні моделі теплових процесів, що протікають у таких складних системах як електричні машини. Побудовані моделі враховують характер теплового обміну на межі розділу шарів та дозволяють розраховувати температуру окремих частин складної області.

Електричні машини розглядаються як складні системами, що містять кілька елементів, одні з яких є провідниками електричного струму, а інші – діелектриками. Основними елементами будь-якої електричної машини є статор і ротор, які під час роботи переміщаються в просторі, один відносно одного. При підведенні електричного струму до цих елементів відбувається їх розігрів за рахунок виділення тепла і механічної енергії, що виникає під час тертя рухомих елементів. При цьому, як відомо, відбувається перерозподіл енергії і перетворення її в теплову. Теплова енергія частково витрачається на підвищення температури ротора і статора, а частково віддається в навколишнє середовище.

Розглянуто температурне поле електричної машини, що складається з двошарового ротора, в якому відсутні джерела тепла та статора з композитного матеріалу алюміній-залізо. З геометричної точки зору, алюмінієвий статор вздовж якого протікає електричний струм та відбувається виділення тепла, у радіальному перерізі має вигляд «2n пелюсткової троянди».

Розглянуто математичну модель розподілу температурного поля в синхронній машині з постійним магнітом, у формі спиць. Математична модель враховує як радіальний, так і осьовий потоки передачі тепла і представляє собою крайову задачу в багатошаровій області з умовами спряження на границях шарів, з різними теплофізичними властивостями. Вся область дослідження розділена на п'ять типів простих підобластей, а саме вал, внутрішній віялоподібний магніт, зовнішній віялоподібний магніт, пазовий отвір і паз. Причому, на границі внутрішнього і зовнішнього віялоподібних магнітів пазового отвору і пазу має місце ідеальний тепловий контакт. Задача розв'язується методом кінцевих елементів.

Побудовано математичну модель теплового процесу в синхронному двигуні складної структури з постійними магнітами. Модель представлена у вигляді крайової задачі для складної дев'ятишарової області з нелінійними граничними умовами на межі шарів.

Запропонований метод розв'язання крайової задачі для рівняння тепlopровідності у складній системі – багатошаровому циліндрі, де в одній частині шарів діють внутрішні джерела тепла, а у іншій – зовнішні. Розглянуто метод розв'язку задачі в умовах невизначеності однієї з граничних умов на межі шарів з кондуктивним теплообміном між шарами.

### **Зауваження. Щодо роботи є такі зауваження.**

1. В роботі запропоновано кілька методів пошуку розв'язків обернених задач для визначення параметрів керування процесами теплообміну у складних системах. Не зовсім зрозумілим є обґрунтування вибору методу

визначення параметрів керування для різних варіантів процесу теплообміну у складній системі при щільному та не щільному контакті між елементами системи та між шарами у багатошарових елементах.

2. В роботі не представлено обґрунтування: чому у складній системі – електрична машина теплофізичні параметри сталі не залежать від температури.

3. В роботі не представлено обґрунтування доцільності використання умови імпедансного типу у математичних моделях теплових процесів у складних багатошарових областях. Пропоную розглянути це зауваження як напрям подальших досліджень.

4. В роботі представлено методи пошуку параметрів керування при розгляді теплового процесу. Проте, якщо це можливо, хотілось би побачити порівняння представлених в роботі методів із методом регуляризації А.М.Тихонова та ін.

5. В роботі не розглянуто питання існування розв'язку нелокальної задачі.

Наведені вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

## ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Кобильської Олени Борисівни “Математичне та комп’ютерне моделювання теплових процесів у складних системах з рухомими та нерухомими осесиметричними елементами” є завершеною науковою роботою, в якій отримано нове рішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці, узагальненні та розвитку теоретичної основи математичного і комп’ютерного моделювання процесів теплообміну у складних системах. Останні включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному kontaktі шарів осесиметричної форми, що нагріваються зовнішніми або внутрішніми джерелами тепла і 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 теплових процесів, розробкою нових обчислювальних методів розв’язання початково-крайових, нелокальних задач у складних системах на основі сучасних засобів інформаційних технологій, що дозволяє підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

Робота не містить plagiatu. До результатів докторської дисертації не включено наукові положення і дослідження за якими захищена кандидатська дисертація.

По своєму змісту робота повністю відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи та профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 при Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. Результати та висновки дисертаційної роботи повністю відповідають меті та поставленим завданням.

Вважаю, що дисертаційна робота Кобильської Олени Борисівни «Математичне та комп’ютерне моделювання теплових процесів у складних системах з рухомими та нерухомими осесиметричними елементами» з урахуванням її актуальності, наукового та практичного значення одержаних результатів, обсягу і рівня публікацій цілком відповідає пп. 9, 10, 12–14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженному 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 автор Кобильська Олена Борисівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

#### Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри теоретичної та  
прикладної системотехніки  
Харківського національного університету  
імені В.Н.Каразіна

/М.Л.Угрюмов/

Підпис доктора технічних наук, професора Угрюмова М.Л. засвідчує

