

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Бердника Михайла Геннадійовича
«Математичні моделі та методи розв'язання узагальнених задач
теплообміну тіл, що обертаються»,
яку представлено на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук зі спеціальності
01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Актуальність теми дослідження та її зв'язок з науковими програмами, планами і темами. В сучасній техніці широко розповсюджені та активно використовуються численні елементи механізмів та машин, що обертаються та знаходяться під дією високих температур та істотних механічних навантажень. В металургії це прокатні валки, вісі станів та електроприводів, в енергетиці – ротори турбін та інші деталі. Процеси інтенсивного теплопереносу з великими градієнтами температур все більше застосовуються у різній галузях техніки. Це явища виникають при горінні та вибухах, розповсюдженні теплоти в означених елементах механізмів, що обертаються, при лазерній обробці матеріалів і т.п. В силу швидкого протікання таких процесів, складних умов експлуатації механізмів їх фізичні дослідження ускладнені. У той же час для прикладних розробок з застосуванням швидкоплинних процесів, а тим більш для керування ними, необхідне глибоке розуміння їх закономірностей. Одним з наукових методів дослідження, що майже єдиним може використовуватися для таких досліджень є математичного моделювання та обчислювальний експеримент. Математичне моделювання широко застосовувалося до процесів теплопереносу, як в теоретичних, так і в прикладних дослідженнях. Цей підхід широко розповсюджений в теплотехнічних дослідженнях та при вивченні явищ з високими швидкостями. Сучасні математичні моделі спроможні урахувати всі аспекти процесів, що досліджуються, а обчислювальна техніка може забезпечити високу продуктивність моделювання з будь якою складністю завдань. Такі моделі адекватно передають потрібні аспекти поведінки досліджуваного явища. Базою математичного моделювання теплопереносу є теорія, що заснована на законі Фур'є для розповсюдження тепла, переважно в твердих тілах. Треба особливо зауважити, що у великій кількості випадків такий традиційний підхід давав

гарну відповідність зі спостереженнями. Однак якраз в зв'язку з появою високоінтенсивних та швидкоплинних процесів з'явилися ознаки того, що традиційний підхід у таких умовах стає неадекватним, і необхідним є більш точний підхід, який краще пристосований до означених процесів. Відомо також, що з рівняннями переносу параболічного типу пов'язані деякі фізично парадоксальні розв'язки. В розв'язках задач з'являються нескінченні значення потоків. Крім того, як впливає з результатів сучасної теоретичної фізики, рівняння параболічного типу є лише першим наближенням у цілій ієрархії рівнянь, пов'язаних з різними рівнями скороченого опису, причому наближенням, справедливим лише для досить повільних процесів. Все вищенаведене вказує як на наукову, так і на практичну актуальність дослідження способів адекватного опису процесів теплопереносу в швидкоплинних явищах. На даний час побудові математичних моделей теплопровідності на основі гіперболічного рівняння приділяється велика увага.

На підставі викладеного вище, дисертаційна робота М.Г. Бердника є сучасною, актуальною, так як вона має завдання розробки моделей і методів моделювання процесу нагрівання тіл обертання з урахуванням релаксації теплового потоку, та присвячена рішенням цього завдання.

Дослідження М.Г. Бердника проводились згідно з планами наукових досліджень кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Тематика роботи цілком відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (від 08.09.2011 р., № 3715-VI і 05.12.2012 р., № 5460-VI), у тому числі розділу «Стратегічний пріоритетний напрям на 2011–2021 рр.: освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії». Тематика дисертаційного дослідження відповідає також тематиці досліджень Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» з математичного моделювання складних процесів і систем, зокрема, в рамках НДР Міністерства освіти і науки України «Синтез, оптимізація та параметризація інноваційних технологій освоєння ресурсів газовугільних родовищ» (№ держреєстрації 0119U000248).

Структура та зміст дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 354 сторінки, із них 304 сторінки

основного тексту, в тому числі 59 рисунків і список використаних джерел із 160 найменувань на 18 сторінках.

У вступі дана загальна характеристика роботи, на основі аналізу сучасного стану моделювання високоінтенсивних процесів нагріву тіл обертання автором обґрунтовано актуальність розв'язуваної наукової проблеми, сформульовано мету роботи та завдання дослідження. Розкрито наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, показано реалізацію та впровадження результатів роботи. Наведено дані про особистий внесок дисертанта в печатних трудах, наведено відомості про апробацію роботи.

У першому розділі проведений аналіз сучасного стану моделювання процесів нагрівання тіл. На підставі аналізу розглянутих матеріалів основним напрямом подальшого дослідження стала розробка нових узагальнених тривимірних математичних моделей температурних розподілів у рухомому середовищі у вигляді крайових задач математичної фізики для гіперболічного рівняння теплопровідності та подальше розв'язання отриманих крайових задач.

У другому розділі дисертантом наводяться основні властивості перетворення Лапласа, формули оберненого перетворення Лапласа. Приводиться основна теорема застосування кінцевих інтегральних перетворень для відрізка та основні означення і формули застосування кінцевих інтегральних перетворень Фур'є і Ханкеля, основні означення і формули застосування кінцевих інтегральних перетворень для кусково-однорідних середовищ. Наведено формули для поліпшення збіжності рядів, одержуваних при застосуванні кінцевих інтегральних перетворень. Увесь зазначений математичний апарат використовується здобувачем в наступних розділах при подальшому математичному моделюванні полів температури в циліндрах і в двоскладових циліндрах, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений застосуванню методів скінченних елементів і Гальоркіна для побудови нових кінцевих інтегральних перетворень, що використовуються при математичному моделюванні температурних полів в тілах обертання з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла. М.Г. Бердником у розділі побудоване нове кінцеве інтегральне перетворення для рівняння Лапласа в довільній області $D \subset R^2$, обмеженій декількома замкненими кусково-гладкими контурами і нове кінцеве інтегральне перетворення для рівняння Лапласа в циліндричній

системі координат. Автором перевірено працездатність нових інтегральних перетворень на тестових завданнях. Результати дозволяють кількісно оцінити точність МСЕ та обрати оптимальну кількість елементів дискретизації.

Четвертий розділ роботи присвячений математичному моделюванню температурних полів в циліндрах, що обертаються. Циліндр розглядається як спрощену модель прокатного валка, що знаходиться під впливом теплового потоку. Тепловий потік, що діє на валок, є наслідком взаємодії з розжареним металевим листом. У розділі автором побудовані математичні моделі і методи розрахунку полів температури в суцільному і порожньому циліндрі, а також у суцільному і порожньому двоскладовому циліндрі кінцевої довжини, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, кінцевої довжини у вигляді узагальнених крайових задач для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Діріхле і Неймана. Наведено порівняння отриманих результатів з експериментальними та відомими теоретичними даними. Порівняння значень температурних полів у прокатних валках, розрахованих за запропонованою моделлю, з одержаними в результаті моделювання на інтеграторі ЕГДА 9160 та натурними замірами температури валка, які здійснювалися на третій клітці стану 1700 гарячої прокатки листа металургійного заводу, показали, що максимальне сподівання і середнє квадратичне відхилення температурного поля, розрахованого за моделлю з відомими теоретичними і експериментальними дослідженнями, є 0,15 і 0,045 відповідно.

У п'ятому розділі автором запропоновано використання методів та математичних моделей, розроблених у попередніх розділах роботи, для вирішення прикладних задач. Автором вперше побудовано математичні моделі і методи розрахунку полів температури в ізотропному і порожньому ізотропному тілі, що обертається з постійною кутовою швидкістю з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла у вигляді крайових задач для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Діріхле і Неймана і змішаними умовами для порожнього ізотропного тіла. Автором побудовано математичну модель розрахунку температурних полів для півсферичного тіла, яке наближено моделює роботу алмазного долота, з урахуванням кутової швидкості буріння та кінцевої швидкості поширення тепла у вигляді крайової задачі математичної фізики для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Діріхле. Також вперше побудовано математичну модель розрахунку полів температури в довільних

областях при електронно-променевому зварюванні у вигляді крайової задачі математичної фізики з граничними умовами Діріхле. За допомогою розробленого інтегрального перетворення для рівняння Лапласа знайдено температурне поле. Знайдений розв'язок узагальненої крайової задачі можна застосувати при модулюванні температурних полів у градирнях подібної форми, виконаних з металопрокату або збірного залізобетону, які широко використовуються в атомній енергетиці, хімічній і металургійній промисловості, а також у градирнях зі склопластику, які знаходять застосування на цукрових заводах, заводах із переробки м'яса, фруктів і овочів, на молокозаводах та інших підприємствах. Крім того, М.Г. Бердником знайдено розв'язок узагальненої крайової задачі теплообміну конуса, який обертається, що може знайти застосування при модулюванні температурних полів, які виникають у багатьох технічних системах (спутниках, роторах енергетичних агрегатів та ін.).

У висновках здобувачем сформульовано основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі.

У додатках наведено копії документів про впровадження результатів дисертаційного дослідження, список публікацій здобувача та фрагменти розробленого програмного забезпечення.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– отримано диференційне узагальнене рівняння переносу енергії в криволінійній системі координат для рушійного елемента суцільного середовища з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла;

– використовуючи диференційне узагальнене рівняння переносу енергії для рушійного елемента суцільного середовища, отримано диференційне узагальнене рівняння балансу енергії твердого тіла, що обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ , теплофізичні властивості якого не залежать від температури, а внутрішні джерела тепла відсутні в циліндричній системі координат;

– побудовано нове кінцеве інтегральне перетворення для рівняння Лапласа в довільній області $D \subset R^2$, обмеженій декількома замкненими кусково-гладкими контурами. За допомогою методів скінченних елементів і Гальоркіна для симплекс-елементів першого і другого порядку розроблено метод знаходження ядра побудованого нового кінцевого інтегрального перетворення;

– побудовано нове кінцеве інтегральне перетворення для рівняння Лапласа в циліндричній системі координат. За допомогою методів скінченних елементів і Гальоркіна для симплекс-елементів першого і другого порядку розроблено метод знаходження ядра побудованого нового кінцевого інтегрального перетворення;

– побудовані математичні моделі і методи розрахунку полів температури в циліндрах і двоскладових циліндрах кінцевої довжини, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла для гіперболічного рівняння теплопровідності;

– побудовані математичні моделі і методи розрахунку полів температури в ізотропному і порожньому ізотропному тілі, що обертається з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Діріхле, Неймана, а також зі змішаними умовами;

– побудовано математичну модель і метод розрахунку полів температури в довільних областях при електронно-променевому зварюванні для рівняння теплопровідності з граничними умовами Діріхле;

– побудовані математичні моделі і методи розрахунку полів температури в параболоїді обертання, півсферичному тілі, тонкостінному однопорожнинному гіперboloїді, прямому круговому конусі, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла у вигляді крайових задач математичної фізики для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Діріхле.

Удосконалено:

– методи розрахунку нестационарних полів температури в циліндрах і двоскладових циліндрах кінцевої довжини, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла;

– методи розрахунку нестационарних температурних полів у ізотропному і порожньому ізотропному тілі, що обертається з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла;

– методи розрахунку нестационарних полів температури в параболоїді обертання, півсферичному тілі, тонкостінному однопорожнинному гіперboloїді, прямому круговому конусі, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла;

– метод розрахунку полів температури в довільних областях при електронно-променевому зварюванні.

Одержали подальший розвиток:

- теорія математичного моделювання процесів теплообміну в ізотропному і порожньому ізотропному тілі, що обертається з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла;
- теорія кінцевих інтегральних перетворень для рівняння Лапласа;
- застосування обчислювальних методів скінченних елементів і Гальоркіна для симплекс-елементів першого і другого порядку при розв'язанні спектральних задач, для знаходження ядер розроблених нових інтегральних перетворень;
- засоби комп'ютерного моделювання на основі розроблених чисельно-аналітичних методів розрахунку полів температури в тілах, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла.

Практична цінність результатів роботи.

До практичного значення отриманих результатів слід віднести розроблені автором чисельно-аналітичні методи розрахунку полів температур:

- в циліндрах і в двоскладових циліндрах, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, розглядаючи циліндр як спрощену модель прокатного валка, який знаходиться під впливом теплового потоку, дозволяють знаходити температурні поля в прокатних валках із більшою точністю;
- в тілах, що обертаються, з урахуванням кінцевої швидкості поширення теплоти, дозволяють знаходити з більшою точністю температурні поля в дисках складної форми, які обертаються, і є найважливішим елементом багатьох машин, тому достатня точність визначення температурного поля в розрахунках на міцність має принципове значення;
- в довільних областях при електронно-променевому зварюванні, що дозволяє отримати більш ефективні і обґрунтовані рішення про напружено-деформований стан при зварюванні;
- в параболоїді, що обертається, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, що дозволяє підвищити точність визначення температурних полів в заготовках при процесі індукційного нагріву;
- при нагріванні в тілі півсферичної форми, що обертається, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, яке наближено моделює

роботу алмазного долота, що дає змогу більш точно прогнозувати температуру алмазного бурового долота з урахуванням кутової швидкості буріння та кінцевої швидкості поширення тепла;

– при нагріванні в однопорожнинному гіперболоїді, що обертається з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, який моделює теплообмін у градирнях подібної форми, виконані з металопрокату або збірного залізобетону, армованого в напрямку меридіанів і паралелей, потребує аналізу їх термоміцності, термовипучування, які широко використовуються в атомній енергетиці, хімічній і металургійній промисловості.

Результати теоретичних досліджень, виконаних у роботі, дозволили: ТОВ «ФАЙСРФЛАЙ АЕРОСПЕЙС УКРАЇНА» використати розроблені в дисертаційній роботі узагальнені математичні моделі і методи розрахунку полів температури в циліндрах і двоскладових циліндрах кінцевої довжини, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, для розрахунків процесів теплообміну при проектуванні елементів ракети-носія, про що свідчить акт впровадження матеріалів дисертації; ТОВ «Зірковий 1» використати розроблений в дисертаційній роботі метод розрахунку полів температури в довільних областях при електронно-променевому зварюванні для отримання більш ефективних і обґрунтованих рішень про напружено-деформований стан при зварюванні з урахуванням термомеханічних процесів, які протікають при зварюванні, про що свідчить акт впровадження матеріалів дисертації; ТОВ «АРМА ГРУПП» використати розроблені в дисертаційній роботі узагальнені математичні моделі і методи розрахунку полів температури в ізотропному тілі, що обертається з постійною кутовою швидкістю, для визначення показників міцності теплонапружених футерувальних плит барабана барабанно-кульових млинів із урахуванням розподілу температур в умовах експлуатації. Отримані розрахунки показників міцності дозволили обрати оптимальні конструктивні геометричні розміри футерувальних плит барабана, що забезпечує більш повільний знос плит, зниження питомої витрати металу і електроенергії, підвищення продуктивності млина, про що свідчить акт впровадження матеріалів дисертації.

Ступень обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, висновки дисертаційної роботи в цілому достатньо обґрунтовані. Для обґрунтування наукових положень автором застосовано методи математичного моделювання, теплообміну, методи математичної фізики, інтегральних перетворень та обчислювальної математики для числової реалізації математичних моделей.

Наукові положення і висновки дисертаційної роботи підтверджені шляхом розв'язання модельних задач. В цілому наукові положення і висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими як теоретично, так і практичним застосуванням.

Достовірність результатів досліджень забезпечується коректністю постановки математичних задач з урахуванням відповідних обмежень та використанням сучасних математичних методів, результатами проведених обчислювальних експериментів, та актами впровадження результатів дисертаційного дослідження у виробничому процесі.

Оформлення дисертації та автореферату. Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. Автореферат містить основні положення, висновки і рекомендації, подані в дисертації, а також всю необхідну для оцінки роботи інформацію. Вступ та висновки автореферату та дисертації співпадають. Мова і стиль викладення дисертації і автореферату чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати, які відповідають меті досліджень. Оформлення дисертації та автореферату відповідає існуючим вимогам, що висуваються до докторських дисертацій в Україні.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. За темою дисертаційної роботи опубліковано 59 наукових праць, у тому числі 26 одноосібних наукових статей, серед яких 25 статей у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України, 1 у закордонному профільному журналі, 20 статей індексується у міжнародних науково-метричних базах, зокрема 1 включена до бази Web of Science, 5 статей – до бази SCOPUS, 27 робіт опубліковано у збірниках наукових праць та матеріалах конференцій.

Зміст та кількість публікацій Бердника М.Г., повнота відображення в них результатів дисертаційного дослідження відповідають існуючим вимогам.

Використання в докторській дисертації результатів наукових

досліджень, за якими була захищена кандидатська дисертація. Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію не виносяться на захист його докторської дисертації.

Зауваження до роботи. Незважаючи на актуальність обраної теми, глибоке дослідження поставлених задач, дисертаційна робота не позбавлена деяких недоліків:

1. Недостатньо уваги автором приділено кількісному аналізу обчислювальної складності запропонованих методів і процедур.
2. В дисертаційній роботі відсутній детальний опис програмних засобів, що використовувались при вирішенні модельних і практичних задач.
3. В роботі досліджуються математичні моделі узагальнених крайових задач теплообміну тіл обертання тільки для граничних умов Діріхле і Неймана, що дещо обмежує їх використання.
4. У роботі дуже стисло наведено опис використання запропонованих математичних моделей для вирішення прикладних задач, зокрема для розрахунків процесів теплообміну при проектуванні елементів ракетно-носія, про що свідчить акт впровадження ТОВ «ФАЙЄРФЛАЙ АЕРОСПЕЙС УКРАЇНА».
5. В тексті дисертації зустрічаються вади оформлення. У ряді місць дисертація переобтяжена матеріалами, які, слід було скоротити.

Загальний висновок

Незважаючи на наведені зауваження, дисертаційна робота Бердника Михайла Геннадійовича «Математичні моделі та методи розв'язання узагальнених задач теплообміну тіл, що обертаються» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково-обґрунтовані та практичні результати, що вирішують важливу та актуальну науково-технічну проблему створення моделей, методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання температурних полів в тілах, що обертаються з постійною кутовою швидкістю, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, що дає змогу точніше описати явище переносу теплоти і підвищити точність розрахунку температурних полів у цих тілах.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки), а саме напрямкам досліджень - розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності

формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів досліджувальних об'єктів, зокрема отримання принципово нових (нетрадиційних) видів математичних моделей у частині отримання нових математичних моделей для моделювання полів температури в тілах, що обертаються, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла. Згідно напрямку досліджень «Розвиток, ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження, проектування, виготовлення та експлуатації об'єктів нової техніки й нових технологій», зокрема модифікація й спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності та алгоритмів, що враховують особливості реальних технічних та технологічних задач у частині узагальнення та обґрунтування і розробки чисельно-аналітичних методів для розрахунку полів температури в тілах, що обертається.

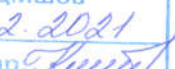
Вважаю, що дисертаційна робота «Математичні моделі та методи розв'язання узагальнених задач теплообміну тіл, що обертаються» за своїм змістом відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 та чинним вимогам Міністерства освіти і науки України щодо докторських дисертацій, а її автор — Бердник Михайло Геннадійовича — заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент —
завідувач кафедри екології, теплотехніки
та охорони праці Національної
металургійної академії України,
доктор технічних наук, професор



О. О. Єр'омін

Підпис зав. каф. екології, теплотехніки
та охорони праці, д.т.н., проф.
Єр'оміна О.О. **ЗАВІРЯЮ**

Відгук надійшов
у Раду: 15.02.2021
Вчений секретар: 

Нач. відділу кадрів НМетАУ



В.С. Шифрін