

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
д.т.н., професору Лобуру Михайлу Васильовичу

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента
кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Любові Михайлівни

на дисертаційну роботу **Самотій Тетяни Сергіївни**
«Методи та засоби нейромережевого моделювання
тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною
структурою», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 12 «Інформаційні технології»
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Тема дисертаційної роботи є, безперечно, актуальною, оскільки відповідає сучасним тенденціям розвитку комп'ютерних наук, зокрема, у сфері побудови метамodelей фізичних процесів на основі технологій штучного інтелекту.

У дослідженні розроблено новий метод моделювання процесів тепломасоперенесення у фрактальних анізотропних середовищах, характерних для широкого кола прикладних завдань: від теплової обробки біоматеріалів і проектування теплоізоляційних систем до аналізу поведінки матеріалів в умовах теплового навантаження.

Актуальність роботи зумовлена потребою у побудові математично вивірених, інформативних і водночас обчислювально ефективних моделей, здатних враховувати нелокальні ефекти, а також ефекти пам'яті. Реалізація таких моделей класичними чисельними методами або вимагає значних ресурсів, або не забезпечує належної точності в таких умовах.

Здобувачкою запропоновано використання фізико-інформованих нейронних мереж (fPINN), що поєднують апарат дробового числення з методами глибинного навчання для моделювання багатокomпонентних процесів. Такий підхід забезпечує фізико-обґрунтовану апроксимацію явищ із просторовою нелокальністю та ефектами пам'яті, що притаманні даним процесам. Представлене рішення розширює можливості сучасного нейромережевого моделювання та відкриває перспективи у напрямі інтелектуального аналізу та прогнозування фізичних процесів у гетерогенних структурах, особливо в умовах обмеженої кількості вимірюваних даних.

Робота органічно вписується в актуальні напрями досліджень, що підтверджується її відповідністю тематиці науково-дослідних тем, виконуваних у НЛТУ України, зокрема, «Технології та засоби математичного моделювання, оптимізації та системного аналізу нерівноважних фізичних процесів» (0121U110154) та «Інтелектуальні моделі та програмні засоби аналізу та прогнозування процесів у самоорганізованих системах» (0124U002470).

Отже, тема дисертаційної роботи є актуальною, сучасною, науково значущою, практично орієнтованою та відповідає спеціальності 122 *Комп'ютерні науки*.

НАУКОВА НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Здобувачкою у дисертаційній роботі отримано результати, які відзначаються науковою новизною і розширюють сучасні підходи до нейромережевого моделювання складних фізичних процесів. Вперше для задач тепломасоперенесення у середовищах з фрактальною структурою розроблено фізико-інформовану нейронну мережу fPINN, яка поєднує фрактальну геометрію з апаратом дробового числення.

Наукова новизна полягає у наступному:

- вперше розроблено метод синтезу фрактальної фізико-інформованої нейронної моделі fPINN для моделювання взаємопов'язаних процесів тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з урахуванням ефектів довготривалої пам'яті та просторової нелокальності;
- отримано нові скінченно-різницеві схеми апроксимації функцій втрат у фрактальній фізико-інформованій нейронній мережі, які інтегровані безпосередньо у процес навчання мережі та дають можливість врахувати ефекти пам'яті та просторової нелокальності в процесах тепломасоперенесення;
- вперше розроблено метод поетапного навчання фрактальної фізико-інформованої нейронної мережі, що забезпечує досягнення допустимого рівня функцій втрат відповідно до заданих критеріїв точності моделі з урахуванням розбалансування градієнтів тепломасоперенесення у фрактальних середовищах;
- розроблено нейромережевий метод ідентифікації параметрів дробових операторів моделі процесу тепломасоперенесення у фрактальних середовищах, який дає змогу визначати параметри ефекту пам'яті та просторової нелокальності на основі наявності обмежених синтетичних або експериментальних даних;
- встановлено закономірності процесу тепломасоперенесення у фрактальних середовищах, що проявляються, зокрема, у взаємозв'язку між дробовими показниками та ступенем анізотропії матеріалу. Показано, що варіювання цих параметрів суттєво впливає на просторово-часову структуру перенесення тепла і вологи.

Отримані результати формують теоретичну й методологічну основу для подальших досліджень і практичного застосування фрактальних

нейромережевих моделей у фізичних задачах, де класичні методи є малоефективними.

КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНОГО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота Самотій Тетяни Сергіївни має чітку структуру та складається зі вступу, чотирьох змістовно наповнених розділів, загальних висновків, списку використаних наукових джерел (208 найменувань) і двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 218 сторінок, з яких основний текст охоплює 175 сторінок. Робота містить 31 рисунок, 1 таблицю, 7 лістингів коду. Зміст дисертації логічно структурований, відповідає поставленій меті та дає змогу оцінити наукову і прикладну цінність дослідження. Загалом, обсяг і наповнення відповідають вимогам, що висуваються до наукової праці на здобуття ступеня доктора філософії.

У вступі авторка обґрунтовує актуальність обраної теми, визначає мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, формулює наукову новизну та практичне значення результатів. Вступ демонструє логічне бачення дослідницької проблеми й чітко окреслює напрями її вирішення.

У першому розділі здійснено аналіз сучасних наукових джерел, присвячених моделюванню тепломасоперенесення у фрактальних середовищах. Наведено особливості структури таких середовищ, обґрунтовано доцільність застосування дробового числення, а також критично розглянуто можливості класичних чисельних методів. Авторка також приділила увагу аналізу літератури з фізико-інформованих нейронних мереж та їх обмежень у задачах із нелокальною поведінкою. На основі цього аналізу було логічно обґрунтовано потребу у створенні нового підходу.

Другий розділ присвячено побудові запропонованої fPINN-моделі, що враховує фрактальну структуру середовища та ефекти пам'яті. Запропоновано нову архітектуру з двома незалежними нейронними мережами для моделювання

температурного та вологісного полів. Введено роздільні функції втрат із включенням дробових операторів Капуто (для часу) та Грюнвальда–Летнікова (для простору). Описано метод поетапного навчання, що забезпечує збіжність навчання мережі, та запропоновано адаптивне масштабування функцій втрат.

У третьому розділі описано програмну реалізацію моделі у вигляді спеціалізованого програмного застосунку з графічним інтерфейсом користувача. Обґрунтовано вибір інструментальних засобів, бібліотек та підходів до оптимізації. Наведено розроблений алгоритм реалізації фрактальної нейронної мережі. Проведено серію чисельних експериментів, серед яких порівняння моделі з класичними методами (скінченних різниць) та експериментальними даними, які підтверджують ефективність моделі. Задекларовано можливість повторного використання навченої моделі без потреби повного перенавчання.

У четвертому розділі авторка розглянула використання fPINN для розв’язання обернених задач, зокрема, для ідентифікації дробових показників моделі тепломасоперенесення, за частковими синтетичними або експериментальними даними. Додатково проведено аналіз впливу архітектурних параметрів на точність розв’язку. Встановлено, що запропонований підхід забезпечує точність відновлення дробових характеристик на рівні 1,3–5 %.

Загальні висновки містять чітко сформульовані положення, що відображають ключові досягнення дослідження.

СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, ЇХ ДОСТОВІРНІСТЬ

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими, логічно послідовними та підтвердженими результатами проведених теоретичних та прикладних досліджень. Авторка застосувала сучасний математичний апарат, зокрема, дробове числення та методи глибинного навчання, що надало змогу достовірно

змодельовати процеси тепломасоперенесення у фрактальних анізотропних середовищах.

Обґрунтованість висновків базується на ретельному аналізі наукових джерел, виваженій постановці завдань, чіткому математичному формалізмі моделі, а також результатах числових експериментів. У роботі продемонстровано ефективність запропонованої нейромережевої архітектури fPINN, підтверджено її збіжність і здатність до вирішення як прямих, так і обернених задач.

Достовірність одержаних результатів засвідчена перевіркою моделі на контрольних прикладах, порівнянням з результатами класичних чисельних методів (зокрема, методу скінченних різниць), а також низькими значеннями похибки апроксимації. Об'єктивність оцінки якості моделі підкріплена аналізом збіжності функцій втрат.

Наукові положення та рекомендації логічно витікають з отриманих результатів, мають достатню аналітичну та прикладну глибину. Вони демонструють високий рівень методологічної підготовки здобувачки та можуть бути використані як у наукових дослідженнях, так і в прикладному моделюванні нерівноважних процесів тепломасоперенесення у різноманітних галузях промисловості.

Загалом, отримані результати й положення є достовірними, узгодженими з поставленими завданнями та відображають самостійність і наукову зрілість авторки.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження Самотій Тетяни Сергіївни полягає у створенні та верифікації нового підходу до моделювання тепломасоперенесення у фрактальних капілярно-пористих середовищах із урахуванням анізотропії, пам'яті та просторової нелокальності.

Розроблена нейромережева модель на основі fPINN дає змогу вирішувати як прямі, так і обернені задачі, що забезпечує її застосування в інженерній практиці, зокрема, при оптимізації технологічних параметрів процесів теплової обробки матеріалів.

Розроблене програмне забезпечення, що базується на методах фрактального дробового числення та глибинного навчання, має модульну структуру та графічний інтерфейс користувача, що забезпечує його використання у підрозділах промислових підприємств і науково-дослідних лабораторіях університетів. Реалізація адаптивного масштабування, поетапного навчання та розділення функцій втрат підвищує гнучкість моделі та її придатність до роботи з обмеженими експериментальними даними.

Модель апробовано на синтетичних даних із наступною валідацією за допомогою класичних числових методів. Розроблений інструментарій забезпечує точну імітацію складних багатофізичних процесів у матеріалах із фрактальною структурою без необхідності побудови сітки, з можливістю швидкої адаптації до нових даних. Застосування fPINN-моделі дозволяє створювати нові підходи до інженерного контролю і цифрового моделювання процесів у пористих та біоматеріалах.

Результати роботи були впроваджені у практику кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка» про що засвідчує акт впровадження від 03.06.2025 року та використовуються для підготовки студентів бакалаврату та магістратури.

ОФОРМЛЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ПОВНОТА ВИКЛАДУ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

Дисертаційна робота Самотій Тетяни Сергіївни оформлена відповідно до встановлених вимог МОН України, зокрема наказу № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій». Структура роботи логічно

побудована, виклад матеріалу послідовний і відповідає науковому стилю. У тексті застосовано фахову термінологію, а зміст дисертації повною мірою відповідає обраному напрямку дослідження за спеціальністю 122 *Комп'ютерні науки*.

Академічна доброчесність дотримана в повному обсязі. Посилання на використані джерела оформлені коректно, матеріали авторських публікацій чітко ідентифіковані в основному тексті. Результати дослідження апробовано на відповідному рівні – вони опубліковані у 15 наукових працях, серед яких одна стаття у періодичних виданнях, що індексується в наукометричних базах Scopus та Web of Science з квантилем Q1; три статті у фахових наукових виданнях України; п'ять матеріалів конференцій, включених до бази Scopus, а також інші публікації у збірниках міжнародних та всеукраїнських конференцій.

У зазначених публікаціях повною мірою відображено основні положення дисертації: постановка задач, архітектура нейромережевої моделі, алгоритми навчання, результати чисельного моделювання, методи валідації та порівняльний аналіз. Це свідчить про завершеність дослідження та його належну наукову апробацію.

Таким чином, дисертаційна робота відповідає критеріям академічної доброчесності, вимогам щодо структури, стилю і повноти представлення результатів у науковому просторі.

ЗАУВАЖЕННЯ ДО ДИСЕРТАЦІЇ

Загалом дисертаційна робота справляє позитивне враження і засвідчує високий науковий рівень дослідження. Водночас доцільно звернути увагу на окремі, зазначені нижче, аспекти:

1. Робота містить детальний опис поетапного навчання, проте не наведено порівняння з одноетапним тренуванням тієї ж архітектури. Така порівняльна оцінка дозволила б продемонструвати переваги запропонованого методу.

2. У дисертації відсутній розгляд тривимірних постановок задач тепломасоперенесення. Доцільно було б, принаймні на концептуальному рівні, проаналізувати особливості та потенційні труднощі масштабування розробленої fPINN-моделі на випадок тривимірного фрактального середовища.
3. Незважаючи на те, що модель fPINN є новою для задач такого класу, варто було навести оцінки обчислювальної складності та часу навчання для різних параметрів архітектури.
4. У розділі з числовими експериментами відсутній систематизований підсумковий аналіз чутливості моделі до варіацій вхідних параметрів, зокрема, дробових показників моделі тепломасоперенесення.
5. У представленому описі алгоритму функціонування програмного забезпечення недостатньо деталізовано механізм підготовки навчальних даних, зокрема, етапи їх попередньої обробки та нормалізації.
6. Доцільно було б висвітлити вплив способу генерації колокаційних точок на точність та збіжність навчання fPINN-моделі при моделюванні пов'язаних процесів у середовищах із фрактальною структурою.
7. У дисертаційній роботі наявні опечатки, редакційні та стилістичні неточності.

Зазначені зауваження не впливають на загальний висновок щодо відповідності дисертаційної роботи вимогам до наукових досліджень на здобуття ступеня доктора філософії.

ВИСНОВКИ ЩОДО ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В ЦІЛОМУ

Вважаю, що дисертаційна робота на здобуття ступеня доктора філософії, Самотій Тетяни Сергіївни на тему «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» є завершеним науковим дослідженням, яке вирішує актуальне наукове завдання застосування інтелектуальних технологій для моделювання

складних фізичних процесів тепломасоперенесення у неоднорідних середовищах з фрактальною структурою.

Робота характеризується науковою ґрунтовністю та має як теоретичну, так і прикладну цінність, що знаходить відображення в опублікованих працях і програмному забезпеченні.

Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та рівнем обґрунтування відповідає вимогам чинного законодавства України, зокрема п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 року №44, а також вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р., і може бути рекомендована до захисту.

На підставі викладеного вважаю, що Самотій Тетяна Сергіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 *Комп'ютерні науки*.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

доцент кафедри програмного
забезпечення комп'ютерних систем
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
ім. І. Сікорського»
кандидат технічних наук, доцент



Любов ОЛЕЩЕНКО

Підпис к.т.н., доцента Олещенко Любові Михайлівни засвідчую.

Учений секретар університету



Валерія ХОЛЯВКО

«21» 08 2025 р.