

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора **Бодяньського Євгенія Володимировича**
на дисертаційну роботу **Самотій Тетяни Сергіївни**

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

Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій супроводжується зростанням інтересу до високоточних моделей процесів зі складною фізичною взаємодією, зокрема тепломасоперенесення у капілярно-пористих анізотропних матеріалах із фрактальною структурою. Такі середовища широко застосовуються в енергетичних, будівельних, біоінженерних та екологічних системах, де актуальним є достовірне моделювання просторово-часового розподілу температури та вологовмісту.

У дисертаційній роботі розглядається побудова нейромережевої моделі, яка поєднує методи глибинного навчання, дробового числення та обчислювальної математики для опису процесів тепломасоперенесення в середовищах із фрактальною структурою з урахуванням ефектів пам'яті, просторової нелокальності та самоорганізації. Такий підхід є новим для задач, які раніше вирішувались методами класичної чисельної математики (методи скінченних різниць, елементів тощо), і демонструє трансформацію традиційних підходів до моделювання за рахунок впровадження сучасних інтелектуальних технологій.

Обрана тематика є актуальною в контексті викликів, пов'язаних із рядом аспектів, серед яких: потреба побудови високоточних імітаційних комп'ютерних аналогів фізичних систем; моделюванням процесів за обмежених чи часткових експериментальних даних; підвищення обчислювальної ефективності симуляцій для багатокomпонентних фізичних процесів. Також вона відповідає напрямам розвитку комп'ютерних наук, таким як: розробка нейромережевих алгоритмів; інтелектуальне моделювання

природних і техногенних процесів; високопродуктивні обчислення з урахуванням структурної складності середовища (фрактальність, анізотропія, нелокальність тощо).

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною як з наукової, так і з прикладної точки зору та відповідає спеціальності 122, оскільки дослідження спрямоване на створення нових комп'ютерних методів моделювання нелінійних динамічних систем із використанням засобів штучного інтелекту.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, сформульовані в дисертаційній роботі, є аргументованими та базуються на комплексному аналізі актуального наукового доробку в сферах досліджень тепломасоперенесення, машинного навчання на основі нейронних мереж, обчислювальної математики. У роботі послідовно викладено етапи синтезу фрактальної фізично-інформованої нейромережі (fPINN), яка інтегрує дробові похідні Капуто та Грюнвальда–Летнікова у структуру функцій втрат, що дає змогу врахувати ефекти довготривалої пам'яті та просторової нелокальності.

Формулювання висновків підтверджується результатами числових експериментів, а також порівнянням в часткових випадках з класичними числовими методами, зокрема, методом скінченних різниць. Це дає змогу зробити висновок про адекватність і достовірність запропонованої моделі. Застосовувані методи поетапного навчання, адаптивного масштабування втрат, розділення підмереж для фізичних полів та функцій втрат для забезпечення збіжності мережі є технічно обґрунтованими і теоретично вмотивованими.

Висновки та рекомендації, наведені у дисертації, логічно впливають із проведених досліджень і спрямовані на практичне впровадження розроблених методів у програмні системи прогнозування нелінійних фізичних процесів.

Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота містить 175 сторінок основного тексту, 31 рисунок, 7 лістингів коду, 1 таблицю, 208 наукових джерел та 2 додатки. Структура дослідження є логічно виваженою та відповідає вимогам до наукових кваліфікаційних праць: вступ, чотири змістовні розділи, висновки, список використаної літератури та додатки. Оформлення виконано відповідно до наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до

оформлення дисертацій», стиль викладення науковий, із дотриманням термінологічної точності та послідовності.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну, практичну значущість, зв'язок із науковими програмами та положення.

У першому розділі здійснено ґрунтовний аналіз наукових джерел за тематикою тепломасоперенесення, зокрема, і у фрактальних капілярно-пористих середовищах. Встановлено доцільність використання апарату дробового числення для опису процесів у фрактальних структурах, а також виявлено потенціал фізико-інформованих нейронних мереж для моделювання задач, у яких проявляються ефекти пам'яті та просторової нелокальності. Обґрунтовано необхідність інтеграції методів штучного інтелекту з фізико-математичними моделями для підвищення точності та узагальнювальної здатності моделювання в умовах обмеженості даних.

У другому розділі обґрунтовано структуру запропонованої нейромережевої моделі (fPINN), її функціональні компоненти та фізичну інтерпретацію. Детально описано включення дробових похідних Капуто та Грюнвальда–Летнікова в структуру втрат, що відображає фізичні ефекти пам'яті та просторової нелокальності. Обрані механізми поетапного навчання, роздільного представлення температурного та вологісного полів, адаптивного масштабування компонент втрат підтверджені аналітичними міркуваннями та числовими експериментами.

У третьому розділі дисертаційної роботи представлено програмну реалізацію запропонованої fPINN-моделі з використанням мови програмування Python та бібліотеки TensorFlow. Детально описано архітектуру програмного застосунку, зокрема реалізацію модулів побудови нейронної мережі, чисельного обчислення дробових операторів на основі різницевих апроксимацій, організації функцій втрат, поетапної оптимізаційної стратегії, а також модулів візуалізації та графічного інтерфейсу користувача. Надано обґрунтування вибору технологічного стеку з позицій обчислювальної ефективності та гнучкості розробки. Отримані результати чисельного моделювання порівнюються в часткових випадках з результатами, отриманими за допомогою класичного методу скінченних різниць, що дає змогу зробити висновок про достовірність запропонованої моделі. Представлені програмні рішення забезпечують відповідність між теоретичною концепцією fPINN-моделі та її алгоритмічним і прикладним втіленням.

У четвертому розділі дисертаційної роботи представлено результати чисельних експериментів, що проведені із застосуванням запропонованої fPINN-моделі для задач тепломасоперенесення у фрактальних середовищах з анізотропними властивостями. Продемонстровано вплив різних типів

гіперпараметрів, стратегій навчання, способів регуляризації на збіжність моделі та точність апроксимації температурного і вологісного полів. Приділено увагу ідентифікації дробових параметрів у задачах оберненого типу за частковими або синтетичними даними, що відтворюють умови обмеженої кількості вимірювань у реальних системах. Запропоновані модифікації fPINN-моделі продемонстрували здатність відтворювати характерні особливості просторово-часового розподілу температури і вологості. Результати досліджень доповнені відповідними графічними візуалізаціями та кількісною оцінкою похибок, що підтверджує ефективність і прикладну спроможність розроблених методів.

Усі висновки, наведені наприкінці розділів і в загальних висновках, є обґрунтованими, базуються на отриманих результатах та не суперечать загальноприйнятим науковим уявленням.

Наукова новизна результатів дослідження

У дисертаційній роботі вперше запропоновано комплексний підхід до моделювання процесів тепломасоперенесення у фрактальних капілярно-пористих анізотропних середовищах з використанням фізико-інформованих нейронних мереж, що поєднує можливості глибинного навчання з апаратом дробового числення.

Основні наукові результати, що визначають новизну дослідження, полягають у такому:

- 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.

Таким чином, дисертаційна робота містить низку нових методичних рішень, які розширюють можливості фізико-інформованого моделювання в умовах структурної складності та обмеженості даних.

Значення результатів дослідження для науки та практики

Результати дисертаційної роботи мають значення як для науки, так і для практичного застосування. З наукової точки зору, авторкою запропоновано нові методи нейромережевого моделювання фізичних процесів у середовищах з фрактальною структурою, що поєднують апарат дробового числення з методами глибинного навчання. Проведені дослідження є внеском у розвиток напрямку нейромережевого моделювання нелінійних динамічних процесів у середовищах з фрактальною структурою.

Результати, отримані авторкою, сприяють удосконаленню підходів до моделювання багатофізичних процесів у системах з ефектами пам'яті та просторової нелокальності, де класичні чисельні методи демонструють обмеження щодо точності, масштабованості та адаптивності. Розроблена fPINN-модель дозволяє не лише ефективно апроксимувати розв'язки диференціальних рівнянь дробового порядку, але й ідентифікувати дробові параметри моделі, які відображають фізичні властивості середовища.

Результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка», що підтверджується актом від 03.06.2025 р., та використовуються під час підготовки здобувачів ступенів бакалавра і магістра.

З прикладної точки зору, отримані результати дослідження мають значення у контексті використання інтелектуальних моделей для аналізу, оптимізації та контролю технологічних процесів та матеріалів у таких галузях, як деревообробка, матеріалознавство тощо. Програмне забезпечення, розроблене в межах дисертації, забезпечує інтерактивне моделювання, візуалізацію динаміки процесів та можливість прогнозування на основі обмежених даних, що є важливим для задач, де отримання експериментальної інформації є складним або обмеженим. Розроблені методи і програмне забезпечення також мають потенціал для застосування в задачах цифрового

моделювання біоматеріалів, розробки енергоефективних конструкцій, прогнозування поведінки композитів, що працюють в умовах складних теплових навантажень.

Повнота відображення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих автором дисертацій працях та дотримання вимог академічної доброчесності

Наукові положення, результати та рекомендації, наведені в дисертаційній роботі, повною мірою відображено в авторських публікаціях. Загалом за темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, серед яких: 1 стаття у міжнародному рецензованому журналі, що входить до наукометричної бази Scopus (журнал Materials, квартиль Q1); 3 статті у фахових виданнях України, включених до переліку МОН (категорія Б) за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»; а також публікації у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій, 5 з яких індексуються у базі Scopus.

Опубліковані роботи охоплюють усі ключові етапи дисертаційного дослідження: постановку задачі нейромережевого моделювання процесів тепломасоперенесення у фрактальних середовищах; формулювання fPINN-моделі із включенням дробових операторів; алгоритмічну реалізацію, програмне забезпечення та результати валідації.

Таким чином, висновки й наукові результати дисертації отримали належне теоретичне і прикладне висвітлення у науковому просторі, а також пройшли апробацію в національних і міжнародних академічних колах.

Перевірка дисертаційної роботи на наявність текстових збігів підтверджує, що подана робота є результатом особистого дослідження, виконаного самостійно, без виявлених ознак плагіату, компіляції, фальсифікації чи фабрикації. Всі текстові запозичення в роботі належно оформлені з дотриманням вимог до академічного цитування. Представлені наукові результати мають оригінальний характер, а виклад матеріалу демонструє індивідуальний стиль авторки та її володіння фаховою термінологією.

Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи

Попри загальне позитивне враження від дисертаційної роботи, доцільно зазначити деякі зауваження до дисертаційної роботи:

1. У підрозділі 1.3, присвяченому фізичним основам процесу тепломасоперенесення, доцільно доповнити виклад коротким узагальненням існуючих підходів моделювання, зокрема у контексті середовищ із фрактальними властивостями, з акцентом на їх перевагах і обмеженнях.
2. Доцільно розширити дослідження шляхом застосування моделі до більшої кількості реальних експериментальних даних з метою поглибленої перевірки достовірності моделі та оцінки точності відтворення температурних і вологісних полів.
3. Алгоритми адаптивного масштабування функцій втрат потребують більш розгорнутого теоретичного обґрунтування, зокрема щодо вибору початкових вагових коефіцієнтів та їх впливу на збіжність.
4. У структурі дисертації відсутні UML-діаграми, які могли б наочно відобразити архітектуру програмного забезпечення та взаємодію між його компонентами.
5. Дисертація зосереджена переважно на розв'язанні прямої задачі тепломасоперенесення у середовищах з фрактальною структурою, тоді як розділ, присвячений ідентифікації параметрів дробових операторів, доцільно доповнити аналізом стабільності розв'язку та впливу шумів у вхідних даних.
6. Варто було розглянути можливість адаптивної генерації колокаційних точок, зокрема із динамічним згущенням у зонах з великими градієнтами температури чи вологості, що могло вплинути на точність розв'язку без зростання обчислювальних витрат.
7. Доцільно було провести аналіз масштабованості моделі при збільшенні розмірності задачі або кількості колокаційних точок, щоб оцінити вплив цих факторів на обчислювальні витрати, швидкість збіжності та визначити межі її застосування.

Усі вищенаведені зауваження не знижують наукової цінності роботи і можуть слугувати підґрунтям для подальших досліджень у межах наукової тематики здобувачки.

Загальний висновок

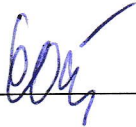
Дисертаційна робота Самотій Тетяни Сергіївни «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що стосується актуальної наукової задачі побудови ефективних інтелектуальних моделей для опису взаємопов'язаних процесів

тепло та масоперенесення у фрактальних середовищах із ефектами пам'яті та просторової нелокальності.

Беручи до уваги актуальність тематики дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків, новизну одержаних результатів, ступінь їх апробації, практичну реалізацію і загальну відповідність вимогам нормативних документів до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а також на підставі Наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. і постанови КМУ № 44 від 12.01.2022 р., Самотій Тетяна Сергіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 122 *Комп'ютерні науки*.

Офіційний опонент:

професор кафедри штучного інтелекту
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор технічних наук, професор



Свгеній БОДЯНСЬКИЙ

Підпис д.т.н., проф. Бодянського С.В. засвідчую:

Перший проректор



Андрій ЄРОХІН