

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

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, доцента Мельника Михайла Романовича
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 виконаної роботи та зв'язок із відповідними планами галузей науки. Дисертаційне дослідження присвячене розробленню математичних методів і програмних засобів нейромережевого моделювання тепломасоперенесення у фрактальних анізотропних середовищах. Тематика роботи є актуальною в контексті сучасних тенденцій розвитку комп'ютерних наук, які орієнтовані на відтворення фізичних процесів, зокрема із застосуванням методів штучного інтелекту, глибинного навчання та фізико-інформованого моделювання. Запропоновані методи спрямовані на розв'язання практично орієнтованих інженерних задач прикладної теплофізики, моделюванні процесів теплової обробки біоматеріалів, а також можуть бути застосовані у розробці теплоізоляційних рішень, аналізі вологісного режиму конструкцій та інших суміжних задачах.

У цьому контексті об'єктом дослідження виступають процеси тепломасоперенесення у капілярно-пористих середовищах з фрактальною та анізотропною структурою, які супроводжуються ефектами довготривалої пам'яті та просторової нелокальності. Для таких процесів застосування класичних чисельних методів часто виявляється малоефективним, недостатньо точним або надто обчислювально затратним. Це зумовлює потребу у нових підходах, зокрема, фрактальних фізико-інформованих нейронних мережах (fPINN), які базуються на інтеграції глибинного навчання з математичними моделями на основі дробового числення для побудови універсальних і стійких до нестачі даних моделей, здатних відтворювати поведінку фізичних полів у неоднорідних середовищах.

Дослідження виконано в межах науково-дослідних тем кафедри комп'ютерних наук НЛТУ України: «Технології та засоби математичного

модельовання, оптимізації та системного аналізу нерівноважних фізичних процесів» (державний реєстраційний номер 0121U110154); «Інтелектуальні моделі та програмні засоби аналізу та прогнозування процесів у самоорганізованих системах» (державний реєстраційний номер 0124U002470).

Це засвідчує відповідність теми дисертації стратегічним напрямкам розвитку в галузі інформаційних технологій, зокрема в частині ресурсоефективного модельовання, впровадження інтелектуальних систем для опису фізичних процесів та розроблення адаптивних програмних засобів у сфері обробки складноструктурованих матеріалів.

Таким чином, обрана тема дисертаційного дослідження є актуальною з наукової, інженерної та практичної точок зору.

Оцінка змісту дисертації та її завершеність. Дисертаційна робота охоплює 218 сторінок, з яких основний текст становить 175 сторінок. Структура дисертації включає вступ, чотири розділи основного змісту, висновки, список використаних джерел (208 найменувань) та два додатки. Роботу ілюстровано 31 рисунком, представлено одну таблицю та сім фрагментів програмного коду. Такий обсяг і структура повністю відповідають встановленим вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 *Комп'ютерні науки*.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, визначено його мету, наукову новизну, практичну цінність і сформульовано основні завдання. У першому розділі проведено детальний аналіз наукових джерел за темою дисертації, зокрема щодо особливостей тепломасоперенесення у фрактальних середовищах, методів модельовання з використанням дробового числення, а також застосування фізико-інформованих нейронних мереж (PINN/fPINN). Приділено увагу узагальненню недоліків класичних чисельних підходів у задачах з анізотропією, ефектами пам'яті та просторовою нелокальністю.

У другому розділі дисертаційної роботи виконано математичну формалізацію задачі тепломасоперенесення у капілярно-пористому фрактальному середовищі, що враховує просторову анізотропію, нелокальність та ефекти пам'яті, у вигляді системи дробових диференціальних рівнянь. Розроблено метод побудови fPINN-моделі, орієнтованої на структурні особливості середовища з фрактальними характеристиками, із виокремленням нейромереж для температурного та вологісного компонентів. Приділено увагу методам апроксимації дробових операторів у моделі нейромережі. Описано реалізацію механізмів адаптивного масштабування складових функцій втрат, а також застосування поетапного навчання для забезпечення збіжності моделі.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено розробці програмної реалізації та структури застосунку, створеного з використанням мови програмування Python та бібліотек TensorFlow, Keras, matplotlib й інших інструментів. У роботі надано візуальні приклади графічного інтерфейсу

користувача, детально описано архітектуру основних модулів програмного забезпечення та принципи їх взаємодії. Приділено увагу лістингам коду, які ілюструють побудову фрактальної фізико-інформованої нейронної мережі, зокрема реалізацію структурно розділених підмереж для моделювання температурного і вологісного полів, визначення функцій втрат на основі дробових диференціальних рівнянь, а також механізмів їх адаптивного масштабування. Розроблена програмна реалізація забезпечує можливість практичного використання отриманих результатів у науково-технічній та прикладній діяльності, зокрема для моделювання тепломасоперенесення у пористих матеріалах з фрактальною структурою, оптимізації режимних параметрів технологічних процесів теплової обробки матеріалів, прогнозуванні змін фізичних та експлуатаційних характеристик будівельних і теплоізоляційних матеріалів, а також у навчальному процесі під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальностями, пов'язаними з комп'ютерним моделюванням.

У четвертому розділі проведено числові експерименти, зокрема моделювання процесів термічної обробки композитних матеріалів та аналіз ефективності розробленої моделі на синтетичних даних. Верифікацію запропонованого підходу здійснено шляхом порівняння результатів моделювання із розв'язками, отриманими методом скінченних різниць та частковими експериментальними даними. Отримані результати підтверджують достовірність fPINN-моделі та її ефективність у задачах, що характеризуються фізичною неоднорідністю середовища.

У висновках стисло сформульовано основні наукові результати, отримані у роботі. Загалом зміст дисертації характеризується логічною завершеністю, послідовністю викладу та відповідністю обраній науковій проблематиці, що свідчить про високий рівень виконаного дослідження.

Повнота висвітлення наукових положень та результатів в опублікованих працях. Апробація результатів. Наукові результати та положення дисертаційного дослідження повно і послідовно висвітлено в опублікованих працях, а також апробовано на численних наукових заходах.

Основні результати дисертації оприлюднено у 15 наукових публікаціях, з яких: 1 стаття опублікована у міжнародному журналі *Materials*, що індексується у базі Scopus (квартиль Q1 за JCR); 3 статті надруковані у фахових виданнях України з галузі 122 «Комп'ютерні науки» (категорія Б); решта публікацій – у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій, 5 із яких індексуються у базі Scopus.

Апробація результатів дисертаційного дослідження здійснена на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях та семінарах, серед яких:

- IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), 2024, Львів;

- IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 2021, 2023, Львів;
- International Conference «CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues (CADMD), 2023, Супрасль (Польща), 2024, Львів;
- Науково-практичні конференції "Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології", НЛТУ України, 2021–2023;
- International Science-Practical Conference «Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects», 2024, Львів;
- International Conference «Data Stream Mining & Processing» (DSMP), 2020, Львів;
- International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 2021, Поляна.

Отже, обсяг і якість апробації свідчать про належний рівень верифікації, актуальності та впроваджуваності отриманих результатів.

Наукова обґрунтованість отриманих результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертаційна робота характеризується високим рівнем наукової обґрунтованості та внутрішньої логічної цілісності. Усі основні положення дослідження базуються на сучасній методології побудови фізико-інформованих нейромереж, поєднаних з апаратом дробового числення, що є адекватним для опису процесів з ефектами пам'яті та просторової нелокальності, притаманних фрактальним середовищам.

Наукова обґрунтованість та коректність отриманих результатів забезпечується:

- математично строгою постановкою задачі тепломасоперенесення у фрактальних капілярно-пористих середовищах з урахуванням анізотропії, ефектів пам'яті та просторової нелокальності;
- використанням дробових похідних Капуто (для опису ефектів пам'яті) та Грюнвальда–Летнікова (для просторової нелокальності), які адаптовано до обчислювальної реалізації в межах глибинного навчання;
- розробкою та реалізацією поетапної стратегії навчання з розділенням функцій втрат, що забезпечує збіжність і дає змогу адаптувати модель до взаємопов'язаних фізичних процесів;
- чисельними експериментами із використанням синтетичних даних та зіставленням отриманих результатів із результатами, одержаними методом скінченних різниць та експериментальними даними, що демонструє точність і достовірність моделі.

Висновки дисертаційної роботи є логічно послідовними, повністю відповідають сформульованій меті та завданням дослідження, підтверджуються отриманими результатами. Рекомендації щодо використання розробленої фрактальної мережі є методично обґрунтованими та можуть бути

впроваджені у задачах інтелектуального керування процесами теплової обробки, проектуванні теплоізоляційних систем тощо.

Наукова новизна отриманих результатів. Дисертаційне дослідження має новаторський характер і вирізняється високим рівнем складності та актуальності.

До найбільш значущих нових наукових результатів належать:

- 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.

Отже, наукова цінність даного дисертаційного дослідження полягає у розширенні теоретичних засад, створенні нових методів моделювання тепломасоперенесення та впровадженні практичного рішення із використанням фізико-інформованих нейронних мереж для аналізу та вдосконалення виробничих процесів.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам. Зміст, структура, мова та науковий стиль дисертації цілком відповідають установленим нормам щодо оформлення кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії. У дисертації дотримано принципів логічної послідовності викладення матеріалу, належного рівня термінологічної

точності, коректності формулювань наукових положень, а також обґрунтованості висновків.

Оформлення дисертації здійснено відповідно до чинних вимог, а саме наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», що передбачає наявність усіх обов'язкових структурних елементів, відповідну стилістику та наукову мову викладу.

Враховуючи високий рівень наукової новизни, обсяг проведених досліджень та вагомість прикладних результатів, слід зазначити, що дисертаційна робота Самотій Тетяни відповідає вимогам, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 *Комп'ютерні науки*.

Відсутність порушення академічної доброчесності. Результати перевірки дисертаційної роботи Самотій Тетяни Сергіївни на наявність текстових збігів засвідчують, що дослідження є самостійно виконаними та не містять ознак академічної недоброчесності, зокрема фальсифікацій, фабрикацій, плагіату чи неправомірного використання чужих матеріалів. Стиль викладу характеризується авторською послідовністю й логікою, а всі наукові джерела коректно процитовано та оформлено. Перевірка не виявила фактів некоректного запозичення або безпідставного використання результатів інших досліджень.

Таким чином, дисертаційне дослідження виконано відповідно до норм академічної етики, без порушення вимог до авторства, оригінальності наукових результатів та академічної доброчесності.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційної роботи полягає в розробці нових методів моделювання складних фізичних процесів тепломасоперенесення у фрактальних анізотропних середовищах на основі фізико-інформованих нейронних мереж. Розроблена fPINN-модель дає змогу враховувати ефекти пам'яті, просторової нелокальності, неоднорідності структури матеріалів, що є характерними для природних і техногенних пористих тіл (зокрема, деревини, композитів, будівельних матеріалів).

Важливою складовою є розроблене програмне забезпечення з графічним інтерфейсом, що забезпечує повний цикл: від введення вхідних параметрів до візуалізації розрахункових полів температури й вологовмісту. Це створює підґрунтя для впровадження розробки у виробничу практику, в науково-дослідні установи, а також у навчальний процес під час підготовки фахівців з комп'ютерного моделювання. Зокрема, окремі положення дослідження інтегровано в зміст навчальних дисциплін «Системи штучного інтелекту», «Застосування систем штучного інтелекту у технологічних рішеннях», «Системи із самоорганізацією та самонавчанням» та «Штучні нейронні мережі».

кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка» та використовуються для підготовки бакалаврів і магістрів спеціальності 122 *Комп'ютерні науки* (акт впровадження від 03.06.2025 р.).

Окрему практичну вагу має нейромережевий підхід до ідентифікації дробових параметрів, що дає змогу з мінімальним обсягом експериментальних даних оцінювати фізичні характеристики матеріалу, зокрема, ступінь еридитарності.

Таким чином, результати дисертації можуть бути використані, як у прикладних задачах керування процесами сушіння, теплоізоляції, енергоефективності, так і у розробці імітаційних моделей середовищ із фрактальними властивостями.

Дискусійні положення, рекомендації та зауваження до змісту дисертації.

1. У першому розділі доцільно було б розширити огляд літератури шляхом включення підходів до ідентифікації дробових показників у задачах тепломасоперенесення. Такий аналіз поглибив би мотивацію до вибору відповідного підходу в дисертації.
2. У роботі доцільним виглядає розширення числового аналізу за рахунок вивчення впливу різних джерел похибок (наприклад, колокаційної сітки, дискретизації дробових операторів тощо) на точність fPINN-моделі.
3. Варто було б додатково проаналізувати доцільність використання математичного апарату дробового інтегро-диференціювання з огляду на ускладнення моделі та збільшення обчислювальних витрат, а також надати обґрунтування, наскільки отримані переваги виправдовують таку складність.
4. У роботі доцільно було б розглянути функціонування моделі в умовах зашумлених вхідних даних, що є типовою ситуацією при роботі з реальними експериментальними вимірюваннями. Такий аналіз дає змогу повніше оцінити стійкість і практичну придатність запропонованого підходу.
5. Розділ 4 не містить узагальнюючої таблиці результатів числового моделювання, що ускладнює систематизацію отриманих даних для подальших досліджень.

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, мають дискусійний або методичний характер і можуть бути враховані авторкою при подальшому розвитку наукових досліджень.

Висновок. Дисертаційна робота Самотій Тетяни Сергіївни «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що присвячене актуальній науковій задачі моделювання

фізичних процесів у пористих середовищах з урахуванням ефектів пам'яті, просторової нелокальності, анізотропії та фрактальної структури матеріалу.

Робота має наукову новизну, містить теоретично обґрунтовані підходи, підтверджені експериментально, та має практичне значення. Основні положення дисертації апробовані на міжнародних конференціях, опубліковані у наукових виданнях, зокрема індексованих у базах Scopus. Структура дисертації відповідає встановленим вимогам, а її зміст рівню підготовки фахівця, який претендує на науковий ступінь доктора філософії.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Самотій Тетяни Сергіївни відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами), а її авторка заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 *Комп'ютерні науки*.

Рецензент:

доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри систем
автоматизованого проектування
Національного університету
«Львівська політехніка»



Михайло МЕЛЬНИК

Підпис д.т.н., доцента Мельника М.Р. засвідчую:

Проректор



Роман ФЕДоришин