



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

Іван ДЕМИДОВ

2025 р.

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації «Методи та засоби нейромережевого моделювання
тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною
структурою»**

**здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
122 – Комп'ютерні науки (галузь знань 12 – Інформаційні технології)**

Самотій Тетяни Сергіївни

**наукового семінару кафедри систем автоматизованого проектування
Навчально-наукового інституту комп'ютерних наук та інформаційних
технологій**

№ 02/25 від 10 червня 2025 р.

1. Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання побудови фрактальних фізико-інформованих нейронних моделей для опису процесів тепломасоперенесення в анізотропних капілярно-пористих середовищах із фрактальною структурою, а також розробці методів її практичної реалізації на основі апарату дробового інтегродиференціювання та глибинного навчання. Розроблені методи спрямовані на оптимізацію процесів моделювання просторово-часової зміни температури та вологовмісту в технологічних системах, а також ідентифікацію параметрів дробових операторів моделі тепломасоперенесення.

Дисертаційна робота є внеском у розвиток інтелектуальних методів моделювання складних фізичних процесів. Запропоновані нейромережеві моделі, що враховують фрактальні властивості середовища та використовують дробові оператори, у поєднанні з розробленими методами поетапного

навчання нейронних мереж з адаптивним балансуванням функцій втрат, забезпечує високу точність при моделюванні тепловологих процесів в анізотропних капілярно-пористих структурах. Крім того, розроблений метод дає можливість здійснювати ідентифікацію дробових параметрів перенесення, які відображають властивості пам'яті та просторової нелокальності середовища.

Розроблене програмне забезпечення для прогнозування зміни температури та вологовмісту призначене для застосування в інженерних задачах – зокрема, у процесах сушіння матеріалів, теплообробки композитів і біоматеріалів, де критичним є врахування ефектів пам'яті та мікроструктурної неоднорідності. Інтеграція запропонованої моделі в інженерні системи сприятиме оптимізації технологічних режимів та підвищенню якості кінцевого продукту.

Отже, розробка та дослідження методів моделювання, що поєднують дробове диференціювання з нейромережевими підходами, є актуальним як для поглиблення теоретичних основ моделювання у фрактальних середовищах, так і для вдосконалення практичних засобів керування тепловологообмінними процесами у технологічних системах.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Тема дисертаційної роботи «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» відповідає науковому напряму кафедри систем автоматизованого проектування Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Дисертаційне дослідження проводилося в рамках науково-дослідних робіт: «Технології та засоби математичного моделювання, оптимізації та системного аналізу нерівноважних фізичних процесів» (№0121U110154, 2021–2023 рр.); «Інтелектуальні моделі та програмні засоби аналізу та прогнозування процесів у самоорганізованих системах» (№0124U002470, 2024–2027 рр.).

У межах зазначених тем здобувачкою розроблено нові фрактальні нейромережеві моделі для дослідження процесів тепло- та масоперенесення в анізотропних капілярно-пористих середовищах із фрактальною структурою, а також запропоновано методи поетапного навчання з адаптивним налаштуванням функціоналів втрат та нейромережевої ідентифікації дробових параметрів.

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Усі наукові результати дисертаційної роботи належать особисто здобувачці. Дослідження Самотій Тетяни Сергіївни виконано в межах концептуальних засад, сформульованої науковим керівником. Під його керівництвом здобувачка самостійно реалізувала повний цикл дослідження – від формулювання постановки задачі до розробки моделей, чисельної реалізації, аналізу результатів, підготовки і представлення напрацювань на наукових конференціях.

У опублікованих працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувачки полягає у синтезі нейромережевої моделі тепломасоперенесення в анізотропних фрактальних структурах із вбудованими фізичними закономірностями; у побудові нових скінченно-різницеви схем функцій втрат; розробленні методу поетапного навчання нейромережі; створенні програмного застосунку в середовищі Python/TensorFlow з модульною структурою, графічним інтерфейсом і засобами візуалізації. Здобувачкою проведено числові експерименти для дослідження тепломасоперенесення у фрактальних середовищах, проведено апробацію результатів моделювання шляхом порівняння з класичними числовими методами, здійснено аналіз похибок. Здійснено ідентифікацію дробових параметрів фрактальних операторів із прийнятною точністю. Окрему увагу приділено адаптації нейромережевих моделей до оброблення та інтерпретації з експериментальними даними їхнього шуму та неповноти.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечується низкою взаємопов'язаних факторів. По-перше, використання основних положень та законів термодинаміки, математичного апарату інтегродиференціювання, покладених у основу роботи. Запропонована структура fPINN-моделі базується на фізичних законах тепломасоперенесення та дробових диференціальних рівняннях, адаптованих до фрактальних середовищ. Досягнута узгодженість архітектури нейромережі з фізичним формулюванням моделі забезпечує об'єктивну відповідність між навчанням моделі та реальними процесами тепломасоперенесення. По-друге, числова реалізація моделей і порівняльний аналіз результатів, отриманих із використанням класичних числових методів, зокрема методом скінченних різниць), дали змогу здійснити верифікацію достовірності моделювання. Аналіз абсолютних похибок і збіжності результатів підтвердив достовірність моделей. Також

перевірено чутливість моделей під час зміни гіперпараметрів і початкових умов.

По-третє, узгодження окремих результатів із відомими теоретичними та експериментальними даними інших дослідників у часткових випадках.

Наукові результати, апробовано шляхом доповідей на міжнародних конференціях, а також оприлюднено у фахових рецензованих виданнях, включених до наукометричних баз Scopus, що додатково підтверджує їх наукову вагомість та обґрунтованість.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання моделювання процесів тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою із застосуванням фрактальних фізико-інформованих нейронних мереж для підвищення ефективності технологічних процесів теплового оброблення матеріалів.

До основних наукових результатів віднесено:

- вперше розроблено метод синтезу фрактальної фізично-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.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Стаття опублікована в міжнародному науковому журналі, що індексується у базах Scopus, Web of Science та PubMed і входить до першого квартиля (Q1) за відповідною наукометричною класифікацією:

1. Sokolovsky Y., Drozd K., Samotii T., Boretska I. Fractional-Order Modeling of Heat and Moisture Transfer in Anisotropic Materials Using a Physics-Informed Neural Network // Materials. – 2024. – Vol. 17, No. 19. – Article number: 4753. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194753>.

Статті, включені до переліку фахових наукових видань України:

2. Sokolovsky Y., Samotii T. Application of an adaptive neural network for the identification of fractional parameters of heat and moisture transfer processes in fractal // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2025. – № 1(7). – С. 11–24. – DOI: <https://doi.org/10.23939/cds2025.01.011>.

3. Sokolovsky Y., Samotii T. Adaptive Fractional Neural Algorithm for Modeling Heat-and-Mass Transfer // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2024. – № 3(6). – С. 139–153. – DOI: <https://doi.org/10.23939/cds2024.03.139>.

4. Соколовський Я., Самотій Т. Нейромережеве моделювання процесу вологоперенесення на основі похідних дробового порядку // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2023. – № 1(5). – С. 108–120. – DOI: <https://doi.org/10.23939/cds2023.01.108>.

Публікації, у матеріалах конференцій:

5. Sokolovsky Y., Samotii T., Kroshnyy I. Physics-informed neural network for modeling the process of heat-and-mass transfer based on the apparatus of fractional derivatives // 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 22–25 February 2023, Lviv, Ukraine. – IEEE, 2023. – P. 30–35. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM58174.2023.10076540>.

6. Sokolovsky Y., Samotii T., Levkovich M., Kroshnyy I., Mokrytska O. Neural network for modeling the process of moisture transfer in materials with fractal structure // 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Science

and Information Technologies (CSIT), 16–19 October 2024, Lviv, Ukraine. – IEEE, 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT65290.2024.10982656>.

7. Sokolovsky Y., Samotii T., Mokrytska O. Adaptive neural network identification of fractional heat and moisture transfer parameters in fractal media // CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues: Proceedings of the XXXII International Conference (Lviv, 28–30 November 2024). – Lviv, 2024. – P. 10. – URL: https://cadmd.lpnu.ua/doc/CADMD_2024_book.pdf.

8. Sokolovsky Y., Samotii T., Mokrytska O. Using fractal physics-informed neural network in solving problems of heat and moisture conductivity // XXXI International Conference CAD in Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD), 26–28 October 2023, Supraśl, Poland. – 2023. – URL: <https://cadmd.lpnu.ua/2023.html>.

9. Samotiy T. S., Sokolovskyi Y. I. Нейромережевий метод дослідження теплообміну у середовищах з фрактальною структурою // Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects: Proceedings of the International Science-Practical Conference (Lviv, 23–25 October 2024). – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.5.11>.

10. Самотій Т. С., Соколовський Я. І. Нейромережевий метод чисельного моделювання вологоперенесення у фрактальних середовищах // Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології: матеріали V наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Львів, 2023). – Львів: НЛТУ України, 2023. – С. 49–51. – URL: <https://conf.nltu.edu.ua/index.php/conf1/article/view/17>.

11. Самотій Т. С., Соколовський Я. І. Сурогатне моделювання процесів тепломасопереносу на основі глибокого навчання з фізичними обмеженнями // Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології: матеріали IV наук. – практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Львів, 2022). – Львів: НЛТУ України, 2022. – С. 62–67.

12. Самотій Т. С. Нейромережевий підхід до розв'язання диференціальних рівнянь параболічного типу // Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології: матеріали III наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Львів, 2021). – Львів: НЛТУ України, 2021. – С. 11–15.

Інші публікації, що додатково висвітлюють результати дисертаційного дослідження:

13. Sokolovsky Y., Nechepurenko A., Samotii T., Yatsyshyn S., Mokrytska O., Yarkun V. Software and algorithmic support for finite element analysis of spatial heat-and-moisture transfer in anisotropic capillary-porous materials // Proceedings of the Second International Conference on Data Stream Mining and Processing (DSMP), 21–25 August 2020, Lviv, Ukraine. – IEEE, 2020. – P. 316–320. – DOI: <https://doi.org/10.1109/DSMP47368.2020.9204175>.

14. Sokolovsky Y., Nechepurenko A., Herasymchuk O., Mokrytska O., Samotii T. Software and algorithmic aspects of automating finite-element discretization // Proceedings of the 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 22–26 February 2021, Lviv, Ukraine. – IEEE, 2021. – P. 28–33. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385238>.

15. Sokolovsky Y., Sinkevych O., Shymanskyi V., Boretska I., Samotii T. Construction of asynchronous cell-automatic model for research the thermal mass transfer process // Proceedings of the XVIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 12–16 May 2021, Polyana, Ukraine. – IEEE, 2021. – P. 29–33. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH53091.2021.9467930>.

Усі наукові результати дисертаційної роботи належать особисто здобувачці. У працях, виконаних у співавторстві, здобувачці належать: [1, 3, 4-7] – постановка задачі синтезу нейромережевої моделі тепломасоперенесення у фрактальних анізотропних середовищах; [1, 2, 3, 5, 6] – побудова архітектури fPINN для моделювання процесів тепломасоперенесення; розроблення схем апроксимації функцій втрат і адаптивного масштабування їх компонентів; [1, 3-6, 8, 11, 12] – реалізація програмного застосунку в середовищі Python/TensorFlow; [1-6, 8-10, 13-15] – числова реалізація нейромоделей та верифікація результатів дослідження; [2, 7] – застосування fPINN до ідентифікації дробових параметрів з використанням обмежених вхідних даних.

Отже, основні положення та результати дисертаційної роботи повно і всебічно відображені у наукових публікаціях здобувачки, що включають статтю у виданні (Scopus, Web of Science, Q1), статті у фахових наукових виданнях України та матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, частина яких індексується міжнародними наукометричними базами.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Основні положення та результати дисертаційного роботи апробовані шляхом доповідей, обговорень і наукової дискусії на низці міжнародних і вітчизняних конференцій, серед яких:

- IEEE 19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), 2024 р., Львів, Україна;
- International Conference «CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues (CADMD)», 2023 р., Супрасль, Польща; 2024 р., Львів, Україна;

- IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 2021, 2023 pp., Львів, Україна;
- International Conference «Data Stream Mining & Processing (DSMP)», 2020 p., Львів, Україна;
- International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 2021 p., Поляна, Україна;
- Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Комп'ютерне моделювання та інформаційні технології», 2021, 2022, 2023 pp., Львів, Україна;
- International Science-Practical Conference «Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects», 2024 p., Львів, Україна.

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Наукове значення дисертаційної роботи полягає у розробленні нових математично обґрунтованих нейромережових моделей тепломасоперенесення у фрактальних анізотропних середовищах із використанням апарату дробового числення та фізико-інформованих нейронних мереж (fPINN). Розроблені методи дають можливість описувати нелокальні ефекти, пам'ять середовища та структурну анізотропію, що характерні для пористих матеріалів. Розроблені моделі та методи сприяють оптимізації процесів теплової обробки та збереженню властивостей матеріалів природного походження шляхом раціоналізації вибору параметрів технологічних режимів та окреслюють перспективи створення нових композитних матеріалів.

Отримані результати можуть бути застосовані в межах освітніх компонентів підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 122 *Комп'ютерні науки* та суміжними галузями. Зокрема, окремі положення були інтегровані в зміст таких навчальних дисциплін кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету «Львівська політехніка», як:

- «Системи штучного інтелекту»;
- «Системи із самоорганізацією та самонавчанням»;
- «Застосування систем штучного інтелекту у технологічних рішеннях»;
- «Штучні нейронні мережі».

Таким чином, результати дослідження мають як наукове значення, так і прикладну цінність для освітнього процесу та подальших досліджень у галузі комп'ютерних наук.

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження зумовлено тим, що розроблені алгоритмічне та програмне забезпечення для дослідження запропонованих математичних моделей тепломасоперенесення у середовищах з фрактальною структурою можуть бути використані для раціонального вибору параметрів технологічних процесів теплової обробки композитних капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, біоматеріалів та будівельних теплоізоляційних матеріалів.

Розроблено алгоритм чисельної реалізації нейромережевої моделі тепломасоперенесення на основі дробового інтегро-диференціального апарату, що дало змогу обчислювати температуру та вологість матеріалу з урахуванням ефектів пам'яті, просторової нелокальності, анізотропії та самоорганізації. Запропоновано алгоритм ідентифікації дробово-диференціальних параметрів моделі, що забезпечує можливість визначення характеристик ефектів пам'яті та просторової нелокальності за умов обмеженої кількості синтетичних або експериментальних даних.

Отримані результати можуть бути використані у галузях деревообробної, целюлозно-паперової, будівельної, біомедичної та хімічної промисловості для оптимізації тепломасообмінних процесів у складних матеріалах фрактальної природи.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України. Вона має чітку композиційну побудову та логічну послідовність викладу матеріалу. Структура дисертації охоплює анотацію, вступ, чотири розділи основного змісту, загальні висновки, список використаних джерел і додатки.

Загальний обсяг дисертації становить 218 сторінок, з яких 175 сторінок займає основний текст. У роботі наведено 1 таблицю, 31 ілюстрацію та 7 фрагментів програмного коду. Список використаних джерел містить 208 найменувань і займає 27 сторінок.

Мова дисертації є науковою, чіткою, граматично й стилістично коректною, відповідає академічним стандартам. Виклад матеріалу структурований, логічно послідовний і забезпечує доступність сприйняття інформації.

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

11. З урахуванням зазначеного, на науковому семінарі кафедри систем автоматизованого проектування Навчально-наукового інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій ухвалили:

11.1. Дисертація Самотій Тетяни Сергіївни «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано наукове завдання розробки та дослідження фізико-інформованих нейромережевих моделей тепломасоперенесення у анізотропних середовищах з фрактальною структурою, розроблення й обґрунтування методів їх навчання та засобів реалізації, що дають змогу розрахувати температуру та вологовміст матеріалу у процесі теплової обробки з урахуванням структурної неоднорідності матеріалу, ефектів пам'яті та просторової нелокальності, що має важливе значення для галузі знань *12 Інформаційні технології*.

11.2. Основні наукові положення, методичні розробки, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, логічні, послідовні, аргументовані, достовірні, достатньо обґрунтовані. Дисертація характеризується єдністю змісту.

11.3. У 15 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них: 3 – у фахових виданнях України зі спеціальності *122 Комп'ютерні науки*; 1 – у міжнародному науковому журналі, що індексується у базах Scopus, Web of Science Core Collection та PubMed, має імпакт-фактор та входить до першого квартиля (Q1) згідно з Journal Citation Reports.

11.4. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, зі змінами).

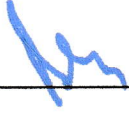
11.5. Дисертація є результатом самостійних досліджень, не містить елементів фальсифікації, компіляції, плагіату та запозичень, що констатує відсутність порушення академічної доброчесності. Використання текстів інших авторів має належні посилання на відповідні джерела.

11.6. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Самотій Тетяни Сергіївни, дисертація «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

за	-	сорок сім (47)
проти	-	немає
утримались	-	немає

Головуючий на науковому семінарі
кафедри систем автоматизованого проектування
ННІ комп'ютерних наук та
інформаційних технологій
завідувач кафедри, д.т.н., професор

 Михайло ЛОБУР

Рецензенти:

д.т.н., с.н.с., професор кафедри САП

 Олена СТАНКЕВИЧ

к.т.н., доцент, доцент кафедри САП

 Михайло МЕЛЬНИК

Відповідальний у ІКНІ за атестацію PhD
к.т.н., доцент

 Віктор ХАВАЛКО

«10» серпня 2025 р.