

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

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, старшого наукового співробітника

Станкевич Олени Михайлівни

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 в галузі знань 12 «Інформаційні технології» зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність теми дослідження

Анізотропні середовища з фрактальною структурою мають непросту геометрію та властивості. У них відбуваються складні процеси перенесення речовини та енергії, зокрема тепла й вологи, що ускладнює класичне математичне моделювання, зокрема, для оптимізації процесів сушіння. Більшість відомих методик не здатні точно відтворити ефекти, притаманні фрактальним середовищам, особливо у випадках багатомасштабної структури та динамічної зміни властивостей у часі. Змоделювати ефекти пам'яті, аномальної дифузії, просторової нелокальності можна за допомогою математичного апарату дробового числення, а залучення штучного інтелекту, зокрема нейромережевих методів, дає змогу ефективно апроксимувати ці процеси.

Саме тому, поставлена у дисертаційній роботі Самотій Тетяни Сергіївни науково-практична задача розроблення та дослідження методів моделювання, які поєднують дробове диференціювання з нейромережевими підходами, актуальна як для поглиблення теоретичних основ моделювання у фрактальних середовищах, так і для вдосконалення практичних інструментів керування тепловологообмінними процесами у високочутливих технологічних системах.

Оцінка достовірності та обґрунтованості основних положень і висновків дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності

Основні наукові положення дисертаційної роботи, висновки та рекомендації є теоретично обґрунтованими, не суперечать методам математичної фізики, механі-

ки спадкових середовищ та дробового числення, теорії штучних нейронних мереж, чисельним методам розв'язання дробових диференціальних рівнянь, статистичному аналізу, об'єктно-орієнтованому підходу до розроблення програмного забезпечення.

Наукові результати підтверджено практичною реалізацією, що відображено в акті їх впровадження, апробацією на наукових семінарах кафедри, міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

Перевірка дисертаційної роботи на наявність текстових збігів підтвердила дотримання вимог академічної доброчесності. Робота виконана самостійно, без плагіату, фальсифікацій, фабрикацій чи неправомірного використання чужих матеріалів; усі джерела коректно оформлено та процитовано. Виконання дисертаційної роботи повністю відповідає встановленим вимогам щодо авторства, оригінальності та академічної етики.

Наукова новизна отриманих результатів

уперше

- розроблено метод синтезу двовимірної фрактальної фізично-інформованої нейронної моделі (fPINN) для моделювання взаємопов'язаних процесів тепловологоперенесення в анізотропних капілярно-пористих середовищах з урахуванням фрактальної геометрії, ефектів довготривалої пам'яті та просторової нелокальності;
- отримано скінченно-різницеві схеми для апроксимації функціоналів втрат у fPINN-моделі для задачі тепловологоперенесення у капілярно-пористих фрактальних середовищах, які враховують ефекти пам'яті та просторової нелокальності та інтегруються безпосередньо у процес навчання нейронної мережі;
- розроблено метод поетапного навчання фрактальної нейронної мережі, що забезпечує досягнення допустимого рівня функціоналу втрат відповідно до заданих критеріїв точності моделі за умов розбалансованих градієнтів, характерних для задач тепловологоперенесення з урахуванням фрактальної структури середовища;
- адаптовано метод автоматичного масштабування вагових коефіцієнтів у багатокомпонентних функціоналах втрат, що забезпечує збалансований вплив кожної фізичної складової під час навчання моделі;
- розроблено нейромережевий метод ідентифікації параметрів дробових операторів моделі тепловологоперенесення, що враховує пам'ять та просторові нелокальності;

- встановлено закономірності тепловологоперенесення у фрактально-організованих капілярно-пористих середовищах, що відображаються у взаємозв'язку між дробовими показниками та ступенем анізотропії матеріалу.

Результати дисертації є оригінальними та належать до інноваційних, оскільки пропонують новий підхід до моделювання складних фізичних процесів у середовищах, для яких класичні чисельні методи малоефективні або непридатні.

Практична цінність одержаних результатів

Запропонований алгоритм чисельної реалізації фрактальної нейромережевої моделі неізотермічного вологоперенесення у двовимірній області дає змогу моделювати динаміку температури та вологості з урахуванням ефектів пам'яті й самоорганізації, що важливо для контролю процесів сушіння та теплової обробки матеріалів.

Процедура ідентифікації дробово-диференціальних параметрів моделі тепло-вологоперенесення у фрактальних середовищах на основі синтетичних або експериментальних даних сприяє підвищенню точності відповідних математичних моделей, а відтак, оптимізації технологічних процесів з урахуванням конкретних умов та даних вимірювань.

Розроблене програмне забезпечення для моделювання динаміки тепло- та вологоперенесення в капілярно-пористих середовищах дає змогу аналізувати поведінку системи в часі та формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимального керування технологічними параметрами. Його можна використовувати як для досліджень, так і для вирішення прикладних інженерних задач.

Практичну цінність результатів дисертаційної роботи підтверджено їх впровадженням у навчальні процеси студентів відповідного освітнього напрямку у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі систем автоматизованого проектування.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, зокрема, 1 статтю – у закордонному фаховому періодичному виданні, яке індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus (Q1), 3 статті – у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (категорія Б), а також 10 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, з яких 5 праць індексуються у Scopus.

Опубліковані праці повною мірою висвітлюють матеріали дисертації.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, які містять 31 рисунок, 1 таблицю та 7 лістингів коду, висновків, списку літератури, який має 208 найменувань, додатків. Обсяг основного тексту дисертації займає 175 сторінок, а повний обсяг роботи – 218 сторінок.

У *вступі* подано актуальність теми дослідження, визначено мету та сформульовано необхідні для її досягнення задачі, розкрито наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих результатів.

У *першому* розділі здійснено комплексний аналіз наукових підходів до математичного моделювання процесів тепло- та вологоперенесення у фрактальних середовищах. Показано недоліки класичних моделей та можливості похідних дробового порядку для відображення складної поведінки фрактальних капілярно-пористих систем. Розглянуто традиційні методи розв'язання таких задач та описано перспективи використання фізично-інформованих нейронних мереж, які здатні враховувати фізичні обмеження, працювати на обмежених даних і ефективно розв'язувати як прямі, так і обернені задачі.

Синтезу фрактальної фізично-інформованої нейронної моделі тепло- та вологоперенесення у капілярно-пористих середовищах із фрактальною організацією присвячено *другий розділ*. Зокрема, обґрунтовано вибір архітектури нейронної моделі з урахуванням дробових похідних Капуто та Грюнвальда-Летнікова. Описано явну математичну форму цих функцій, адаптовану для нейромережевого навчання, а також подано їх відповідні різницеві апроксимації, які відтворюють ефекти пам'яті та просторової нелокальності в межах нейромережевої архітектури. Запропоновано нову архітектуру з двома незалежними нейромережами для апроксимації температурного та вологісного полів, а також розділення функціоналів втрат для кожної фізичної величини. Метод фрактальної фізично-інформованої нейронної мережі адаптовано до задачі моделювання у фрактальних середовищах шляхом запропонованого підходу поетапного навчання. Для підвищення ефективності навчання розроблено механізм адаптивного масштабування компонент функцій втрат.

Третій розділ присвячений розробленню архітектури та реалізації програмного застосунку для моделювання процесів тепло- та вологоперенесення у фрактальних капілярно-пористих анізотропних середовищах на базі фрактальної фізично-інформованої нейромережі. Представлено структурну організацію програмних модулів, що охоплюють введення параметрів, генерування навчальних

даних, формування функцій втрат, навчання нейромережі та візуалізацію результатів. Окремо виділено модулі, які забезпечують порівняльне моделювання із застосуванням класичних чисельних методів та аналізують похибки й збіжність моделі. Створено систему збереження параметрів, ваг моделі та результатів симуляції для забезпечення відтворюваності експериментів. Обґрунтовано вибір бібліотек, функцій втрат, стратегій навчання та аналізу похибок.

Аналіз результатів досліджень подано у *четвертому* розділі. Вивчено вплив архітектурних параметрів моделі (кількості шарів, кількості нейронів, типів активаційних функцій) на точність моделювання та збіжність навчання. Порівняно між собою регуляризаційні стратегії. Показано ефективність застосування адаптивного масштабування ваг у функції втрат. Продemonстровано ефективність підходу fPINN для вирішення обернених задач, зокрема, ідентифікації дробових показників лише на основі часткових експериментальних або синтетичних даних.

У загальних висновках сформульовано основні наукові результати, узагальнено ефективність моделі, її точність, гнучкість, потенціал до подальшого розвитку та практичного використання.

Загалом зміст та оформлення дисертаційної роботи відповідають вимогам до наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії та свідчать про належний рівень її наукової цінності та завершеності.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. Головним елементом наукової новизни виконаних дисертаційних досліджень є розроблення fPINN-моделі для розв'язання задач тепломасоперенесення у фрактальних середовищах, однак у роботі відсутнє обґрунтування вибору саме такої моделі, зокрема, у порівнянні з іншими альтернативними нейромережевими підходами.

2. У дисертації варто було б надати порівняння результатів нейромережевої моделі з класичними числовими методами щодо витрат обчислювального часу та залучення ресурсів оперативної пам'яті.

3. У роботі використано складні багатокомпонентні функції втрат, однак недостатньо висвітлено питання аналізу чутливості моделі до зміни вагових коефіцієнтів під час їх адаптивного масштабування.

4. У розробленому програмному комплексі для моделювання процесів тепловологоперенесення передбачено введення дробово-диференціальних показників α , β , γ (Рис. 3.2). Доцільно було б доповнити дослідження аналізом їхнього впливу на швидкість збіжності моделі. Зокрема, корисно було б оцінити

особливості навчання розробленої фрактальної нейронної мережі за зменшення порядку похідних у діапазоні 0,1–0,5 для параметра α та 1,1–1,5 для β .

5. У четвертому розділі дисертації представлено глибокі дослідження впливу на ефективність роботи нейронної мережі функцій активації нейронів, оптимізатора, кількості шарів мережі та нейронів у прихованому шарі. Однак кінцеві рекомендації щодо основних гіперпараметрів мережі за результатами проведеного моделювання не включено ні у висновки до розділу, ні в загальні висновки до роботи.

Наведені зауваження загалом не впливають на отримані результати та зроблені висновки.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертація Самотій Тетяни Сергіївни на тему «Методи та засоби нейромережевого моделювання тепломасоперенесення в анізотропних середовищах з фрактальною структурою» є завершеною науковою працею. За структурою, мовою, стилем викладення дисертаційна робота відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року (зі змінами) «Про затвердження порядку присудження ступені доктора філософії та скасування рішення про присудження ступня доктора філософії», а її авторка, Самотій Тетяна Сергіївна, заслуговує присудження їй ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Рецензент:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
професор кафедри систем
автоматизованого проектування
Національного університету
«Львівська політехніка»



Олена СТАНКЕВИЧ

«Підпис д.т.н., с.н.с. Станкевич О. М. засвідчую»

Взяв/взяла



Доктор Р. Бродявський