

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора фізико-математичних наук, професора  
**Костробія Петра Петровича**

на дисертаційну роботу *Левкович Мар'яни Володимирівни*  
**«Математичне моделювання деформаційних і тепломасообмінних процесів у середовищах з фрактальною структурою»**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### **Актуальність теми дисертації**

Сучасні експериментальні дослідження показали, що багато біологічних, фізичних, технологічних процесів мають складну фрактальну структуру. Одним із таких технологічних процесів є сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини. Моделювання процесів деформування та теломасоперенесення в деревині з урахуванням фрактальної структури під час сушіння зводиться до використання нетрадиційних підходів, а саме використання різних типів дробових інтегро-диференціальних операторів та їхніх апроксимацій.

Виправданість застосування такого складного математичного апарату для моделювання полягає у тому, що досі такі властивості матеріалу як структурна неоднорідність, біологічна мінливість реологічних властивостей, складна природа просторових кореляцій, наявність ефектів «пам'яті», самоорганізації та детермінованого хаосу при традиційному підході не було враховано. Таким чином, врахування наведених властивостей матеріалу при моделюванні деформаційних та теплообмінних процесів під час сушіння деревини, дає можливість оцінити залишкові та пружні значення напруження, що дозволить виготовляти продукції з високими показниками якості, розробляти нові матеріали на основі деревини.

Таким чином тема, мета та завдання, поставлені у дисертаційній роботі Левкович М.В. , є без сумніву **актуальними**.

Важливість та перспективність отриманих здобувачем результатів підтверджується також тим, що робота відповідає програмам і планам наукових досліджень Національного лісотехнічного університету України (м.Львів), що виконувалась у межах науково-дослідних робіт МОН України зокрема за темами «Математичне і програмне забезпечення автоматизації розрахунку багато-фазних термодинамічних систем», № держреєстрації 0110U000657; «Програмно-алгоритмічні засоби та інформаційні технології автоматизації досліджень енерго-ефективних процесів сушіння деревини», № держреєстрації 0113U001268; «Математичне моделювання нерівноважних

деформаційно-релаксаційних і тепло-масообмінних процесів у середовищах з фрактальною структурою», № держреєстрації 0115U002316. У рамках виконання цих робіт Левкович М.В. була виконавцем та отримала усі результати, які становлять наукову новизну дисертаційного дослідження.

### **Структура та зміст дисертації**

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 209 найменувань та п'ятих додатків. Обсяг роботи становить 202 сторінки, в тому числі основного тексту 124 сторінки.

У *вступі* висвітлено обґрунтування актуальності теми роботи, мети та завдання досліджень, окреслено наукову новизну та практичну цінність математичного моделювання в'язко-пружного деформування та неізотермічного вологоперенесення капілярно-пористих матеріалів з урахуванням фрактальної структури у процесі сушіння, наведено дані про особистий внесок здобувача та апробацію одержаних результатів дисертаційної роботи.

У *першому розділі* дисертаційної роботи проведений аналіз розвитку дробового інтегро-диференціального апарату та його використання для моделювання процесів в'язко-пружної деформації та тепломасоперенесення під час сушіння капілярно-пористих матеріалів. Наведено актуальні аналітичні та чисельні методи реалізації фрактальних нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних, проаналізовано методи ідентифікації нецілочисельних інтегро-диференціальних параметрів моделей в'язко-пружного деформування. Розділ містить необхідну інформацію, яка викладена у достатній кількості у науковому та методологічному аспектах. Матеріали розділу підтверджують актуальність дослідження дисертаційної роботи.

У *другому розділі* синтезовані двовимірні математичні моделі неізотермічного вологоперенесення з врахуванням ефекту «пам'яті» та просторової кореляції капілярно-пористих матеріалів у процесі сушіння. Наведено чисельний метод реалізації представленої математичної моделі, що ґрунтується на застосуванні скінченно-різницевого методу предиктор-коректор. Розроблено явні та неявні скінченно-різницеві схеми та встановлені умови стійкості та збіжності для них. Результати досліджень цього розділу можуть бути використані для проектування систем автоматизованого моделювання та аналізу тепломасообмінних і деформаційно-релаксаційних процесів.

*Третій розділ* дисертаційної роботи присвячений дослідженню одновимірних дробово-диференціальних математичних моделей Максвелла, Кельвіна та Фойгта. Враховуючи нецілочисельний інтегро-диференціальний

апарат та метод перетворення Лапласа дисертантом отримано співвідношення напруження та деформації відносно часу для трьох реологічних моделей у інтегральній формі, що дало можливість визначити ядра релаксації та повзучості з урахуванням фрактальної структури матеріалу. Важливо, що результати досліджень у цьому розділі взяті за основу у четвертому розділі дисертаційної роботи.

У *четвертому розділі* побудовано загальну двовимірну модель в'язко-пружної деформації у середовищах з фрактальною структурою у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів, що дає можливість розширити застосування моделі враховуючи анізотропію тепломеханічних характеристик деревини, ефекти «пам'яті», просторову нелокальність, біологічну мінливість реологічних властивостей матеріалу. Побудовано двовимірні дробово-диференціальні деформаційно-релаксаційні моделі для реологічних моделей Фойгта, Максвелла та Кельвіна під час сушіння деревини з врахуванням механіки кожної з моделей. Розроблено чисельний метод реалізації двовимірних в'язко-пружних моделей у середовищах, яким властиві вище наведені характеристики. Адаптовано метод розщеплення двовимірних ядер для дробово-диференціальних реологічних моделей. Цей розділ дисертаційної роботи дуже важливий, оскільки у ньому комплексно досліджено пов'язані процеси тепломасоперенесення та деформування у капілярно-пористих матеріалах під час сушіння з урахуванням ефектів «пам'яті» та самоорганізації.

Практично цінним є розроблення на основі створених математичних моделей та методів аналізу програмного забезпечення для чисельної реалізації отриманих математичних моделей. У *п'ятому розділі* автором дисертації розроблено алгоритм ідентифікації фрактальних параметрів реологічних моделей, що дає можливість оцінити значення пружних та залишкових деформацій, врахувати ефект «пам'яті» форми деревини та вплив початкового напруження, вологості капілярно-пористого матеріалу на деформаційні перетворення у процесі сушіння; встановлено закономірності чисельного моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування деревини під час сушіння, розроблено прикладне програмне забезпечення із графічним інтерфейсом для введення вхідних параметрів технологічного процесу сушіння деревини, що дозволяє обчислити значення температури та вологовмісту, величини компонент напружень та деформацій. Встановлено, що відмінність між кривими напруження із урахуванням фрактальної структури та без її урахування для твердіших порід не перевищує 16,7%, натомість різниця для порід із меншою густиною 19,6 – 24%. З цього можна зробити висновок, що врахування фрактальної структури матеріалу має суттєвий вплив на деформаційні процеси. Проведено валідацію та верифікацію побудованих математичних

моделей у дисертаційній роботі шляхом співставлення із результатами інших дослідників, експериментальними даними, теоретичними відомостями.

У *п'ятьох додатках* подано довідки про використання результатів дисертаційного дослідження; експериментальні дані повзучості та схеми деформаційних перетворень деревини з урахуванням ефекту «пам'яті», значення параметрів ідентифікації, коефіцієнта кореляції та оцінки розходження результатів; тепломеханічні характеристики деревини; лістинг програмного коду чисельної реалізації математичної моделі тепломасоперенесення у середовищах з фрактальною структурою; список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

**Достовірність одержаних результатів, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечується коректним застосуванням сучасних методів математичного моделювання, теоретично обґрунтованих та апробованих методів математичної фізики та обчислювальної математики, узгодженням окремих результатів досліджень з відомими з літературних джерел тестовими прикладами.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується також апробацією на наукових конференціях, опублікуванням 6 статей у фахових виданнях з технічних наук, зокрема 2 статті у закордонних виданнях, одна з яких включена до науко-метричної бази Scopus. Загалом є 9 праць, які входять до наукометричної бази Scopus.

Серед нових наукових результатів слід відмітити наступні:

- **вперше** побудовано двовимірні математичні моделі деформаційно-релаксаційних процесів під час сушіння капілярно-пористих матеріалів, котрі відрізняються від відомих наявністю дробово-диференціальних параметрів, які дають можливість оцінити залишкові та пружні значення деформацій під час сушіння деревини, а також враховувати ефекти «пам'яті» та самоорганізації, анізотропію реологічних та теплофізичних характеристик матеріалу;

- розроблено **нову** двовимірну математичну модель неізотермічного вологоперенесення у процесі сушіння деревини з урахуванням дробового інтегро-диференціального апарату, що дає можливість розширити множину її реалізацій шляхом врахування ефекту «пам'яті» форми та структурної неоднорідності капілярно-пористого матеріалу для періоду сталої та падаючої швидкостей сушіння;

- **вперше** побудовано різницеві схеми для числового аналізу двовимірної математичної моделі неізотермічного вологоперенесення капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою у процесі сушіння.

Для їх реалізації адаптовано метод предиктор-коректор із встановленням умов стійкості, що забезпечує врахування еридитарності та самоорганізації в запропонованих моделях сушіння деревини;

- адаптовано метод розщеплення двовимірних ядер повзучості для дробово-диференціальних реологічних моделей під час сушіння капілярно-пористих матеріалів, який дозволив за експериментальними даними для одновимірних моделей визначити функцію швидкості об'ємної та зсувної повзучості, здійснити ідентифікацію фрактальних параметрів, враховуючи пружні та залишкові деформації у процесі сушіння деревини;

- встановлено **нові** закономірності тепло-масообмінних та деформаційних процесів з урахуванням фрактальної структури деревини під час сушіння, що дають можливість враховувати ефекти «пам'яті» та самоорганізації матеріалу залежно від породи, тепломеханічних характеристик, технологічних параметрів агента сушіння, напряму анізотропії для періоду сталої та падаючої швидкості сушіння.

### **Практична цінність одержаних результатів.**

Практична цінність одержаних у роботі результатів підтверджена Актом про впровадження результатів дисертаційної роботи від 23.08.2018р., згідно якого результати дисертаційної роботи використано для розрахунку тепло-масообмінних та деформаційно-релаксаційних процесів під час конвективного сушіння деревини з урахуванням її властивостей еридитарності та самоорганізації, що дозволяє підвищити якість висушеної деревини на ВКФ «Ледас-Україна» (м.Хуст, Закарпатська область). Крім того, результати наукових досліджень використано у навчальному процесі кафедри інформаційних технологій Національного лісотехнічного університету України для викладання дисциплін: «Моделювання систем», «Математичне моделювання в інформаційних технологіях», «Чисельні методи», «Автоматизовані системи наукових досліджень», а також під час виконання бакалаврських і магістерських робіт за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», що підтверджується відповідним Актом впровадження у навчальний процес від 17.05.2018р.

Розроблений алгоритм чисельної реалізації моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у двовимірній області на підставі дробового інтегро-диференціального апарату в процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів. Для врахування ефекту «пам'яті» та самоорганізації, а також визначення такого напружено-деформаційного стану, який би не перевищував границі міцності матеріалу та підвищував його якості у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, розроблено алгоритм ідентифікації фрактальних параметрів реологічних моделей. Розроблено програмне забезпечення для скінченно-

різницевого розрахунку теплообмінних та деформаційно-релаксаційних процесів, унаслідок чого можливо проаналізувати динаміку зміни температури, вологовмісту та компонент напружено-деформаційного стану деревини під час сушіння враховуючи її фрактальну структуру та технологічні параметри періоду сталої та падаючої швидкості сушіння.

### **Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи**

Результати дисертації опубліковані у 22 працях, серед яких 7 статей, з них 6 – у наукових фахових виданнях, 1 – одноосібна, 1 – у журналі, що входить до науко-метричної бази даних Scopus, 2 – у наукових виданнях іноземних держав; 14 публікацій у матеріалах наукових конференцій, з яких 8 включено до наукометричної бази Scopus.

### **Оформлення дисертації та автореферату**

Викладені в авторефераті актуальність теми, мета і завдання дослідження, наукова новизна одержаних результатів та їхнє практичне значення, короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Особистий внесок здобувача в спільних публікаціях відображено в дисертації та авторефераті. Основні наукові результати, які викладені в спільних публікаціях, отримані дисертантом самостійно. Автореферат оформлено згідно з вимогами.

Дисертація Левкович Мар'яни Володимирівни відповідає діючим вимогам щодо оформлення дисертаційних робіт. Робота написана грамотно, послідовно та має завершену логічну структуру. Стиль викладення наукових положень та отриманих результатів забезпечує доступність їх сприйняття.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки), а саме напрямкам досліджень: розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів досліджувальних об'єктів. Зокрема: отримання принципово нових (нетрадиційних) видів математичних моделей, еквівалентні та апроксимаційні методи перетворення і модифікації (лінеаризація, дискретизація тощо), оцінки, ідентифікація та оптимізація математичних моделей, методи теорії подібності й аналізу розмірностей.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

Разом з тим, дисертаційна робота Левкович М.В. містить ряд недоліків. Зокрема,

1. В аналізі літературних джерел доцільно навести опис різних типів дробових похідних, їхні властивості та апроксимації. Варто також було б дослідити який тип похідної доцільно використовувати для опису таких властивості матеріалу як ефект «пам'яті», самоорганізація та детермінований хаос.
2. Граничні умови третього роду математичної моделі неізотермічного вологоперенесення містять дробову похідну  $\gamma$  ( $0 < \gamma \leq 1$ ). Необхідно було б обґрунтувати вибір нецілочисельного порядку похідної у граничних умовах, проаналізувати її фізичний зміст, зазначити переваги використання дробової похідної на відміну від класичної.
3. При перетворенні Лапласа дробової похідної (формула (3.6)) у аналітичних співвідношеннях, що описують напружено-деформаційний стан матеріалу, з'являються початкові значення напруження та деформацій. Дисертанту варто було б вказати, які початкові умови прийняті ним у роботі. Адже при аналітичному аналізі початкові значення таких функцій, якщо вони є неперервно-диференційовані, рівні нулю. Проте на практиці, у технологічному процесі сушіння матеріал у початковий момент часу як правило є навантаженим.
4. У четвертому розділі доцільно було б обґрунтувати використання законів Гука та Ньютона при побудові двовимірних дробово-диференціальних математичних моделей деформаційно-релаксаційних процесів капілярно-пористих матеріалів під час сушіння.
5. Показники дробових похідних, що входять у математичні моделі деформаційно-напруженого стану деревини під час сушіння визначаються шляхом ідентифікації. Доцільно було б навести обґрунтованість вибору нецілочисельних похідних  $\alpha, \beta, \gamma$  у математичній моделі неізотермічного вологоперенесення.
6. У п'ятому розділі не обґрунтовано чому для ідентифікації дробово-диференціальних параметрів реологічних моделей вибрано лише перших два члени ряду двовимірної функції Міттаг-Леффлера. Адже вибір іншої кількості членів ряду суттєво впливає на результати досліджень.

Також є ряд описок у дисертаційній роботі.

Вказані зауваження, однак, не зменшують загального позитивного враження щодо новизни та якості дисертаційної роботи в цілому.

### **Загальна оцінка роботи і висновок**

Подана до захисту дисертаційна робота Левкович М.В. «Математичне моделювання деформаційних і тепломасообмінних процесів у середовищах з фрактальною структурою» є оригінальним і завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язано актуальне наукове завдання – підвищення ефективності математичного моделювання процесів тепломасоперенесення

та деформування деревини з урахуванням ефекту «пам'яті» та самоорганізації у процесі сушіння для зменшення залишкових напружень у деревині й визначення такого напружено-деформаційного стану, який не перевищував би границі міцності матеріалу.

Результати роботи є новими та достатньо апробованими, зокрема доповідались на всеукраїнських та міжнародних конференціях. Аналіз публікацій дисертанта показує, що основні результати дисертації отримано автором самостійно. Автореферат адекватно відображає зміст роботи.

За актуальністю теми, рівнем та обсягом виконаних досліджень, науковою новизною та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а також вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій, зокрема п. 9, 11-14 “Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567, а її автор **Левкович Мар'яна Володимирівна** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,

доктор фізико-математичних наук, професор,

завідувач кафедри прикладної математики

Національного університету

«Львівська політехніка»

П. П. КОСТРОБІЙ

Підпис Костробія П. П. засвідчую:

Вчений секретар

Національного університету

«Львівська політехніка», доцент



Р. Б. Брилинський