

## ВІДГУК

### офіційного опонента проф. Михальова О.І.

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

Процес сушіння капілярно-пористих матеріалів є енергоємним та довготривалим. Для вирішення задачі вибору раціональних параметрів режиму сушіння, що забезпечують необхідну якість висушеного матеріалу за найкоротшу тривалість процесу сушіння, необхідно мати достатньо ефективні математичні моделі процесів неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування матеріалів, які б враховувала їх капілярно-пористу фрактальну структуру. До таких капілярно-пористих матеріалів можна віднести деревину з “непостійною” полікапілярною структурою клітинних стінок, які характеризуються значною питомою поверхнею. В той же час відомо, що навіть незначна зміна вологості для значень, що є меншими від границі гігроскопічності суттєво впливає на механічну поведінку деревини. При цьому відомо, що деревина є складним природним полімером, який характеризується значною мінливістю фізико-механічних властивостей у різних напрямках анізотропії, складною природою просторових кореляцій, наявністю ефектів «пам'яті» та самоорганізації. Враховуючи складність структури деревини та її властивість «запам'ятовувати», відновлювати початковий фізичний стан, що відбуваються за рахунок переходу одного типу деформацій в інші, зміни вологості та температури, актуальним є проведення математичного моделювання тепломасообмінних процесів та в'язко-пружного деформування деревини під час її сушіння з урахуванням еридитарності та структурної пам'яті матеріалу.

#### **Відповідність спеціальності.**

Дисертаційна робота (мета, задачі досліджень, методи досліджень, висновки, область використання, впровадження) повністю відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, що були проведені здобувачкою, тісно пов'язані з трьома науково-дослідними роботами Національного лісотехнічного університету України, а саме: “Математичне і програмне забезпечення автоматизації розрахунку багатофазних термодинамічних систем”, № держреєстрації 0110U000657, 2011-2012 рр.; “Програмно-алгоритмічні засоби та інформаційні технології автоматизації досліджень енергоефективних процесів сушіння

деревини”, № держреєстрації 0113U001268, 2013-2014 рр.; “Математичне моделювання нерівноважних деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів у середовищах з фрактальною структурою”, № держреєстрації 0115U002316, 2015-2017 рр.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

У дисертаційній роботі вирішено низку питань, які об'єднані єдиною метою – побудова та дослідження математичних моделей деформаційно-релаксаційних, волого- та теплообмінних процесів під час сушіння капілярно-пористих матеріалів з урахуванням їхньої фрактальної (природної) структури, розроблення скінченно-різницевої схем для апроксимації цих математичних моделей, що має важливе значення для обґрунтування технологій сушіння деревини за умови забезпечення необхідної якості продукції.

- 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», анізотропію реологічних та теплофізичних характеристик матеріалу;

- вперше розроблено 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 отримано різницеві схеми для апроксимації двовимірної математичної моделі неізотермічного вологоперенесення капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою у процесі сушіння та для їх реалізації адаптовано метод предиктор-коректор із встановленням умов стійкості, що забезпечує врахування еридитарності та пам'яті деревини під час сушіння;

- набув подальшого розвитку (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» матеріалу залежно від породи, тепломеханічних характеристик, технологічних параметрів агента сушіння, напряму анізотропії для періоду сталої та падаючої швидкості сушіння.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Наукові положення дисертації в цілому обґрунтовані, результати досліджень, а також встановлені на їх основі висновки мають достатню обґрунтованість і достовірність. Для доведення викладених положень автор в цілому конкретно застосовує: методи механіки спадкових середовищ, математичної фізики та апарату дробового інтегро-диференціювання для побудови математичних моделей; інтегральний метод перетворення Лапласа для відшукання аналітичних розв'язків математичних моделей в'язко-пружної деформації; скінченно-різницеві схеми з використанням методу предиктор-коректор для чисельної реалізації математичної моделі неізотермічного вологоперенесення; метод умовного завдання відомих функцій та метод інтеграла Фур'є для визначення умов стійкості різницевих схем; метод Проні, ітераційний метод та покоординатного спуску для ідентифікації фрактальних параметрів (порядків дробовості) дробово-диференціальних моделей. Окремі результати дисертації узгоджені з відомими в літературі експериментальними та теоретичними результатами для часткових випадків, що отримано на класичних моделях з цілочисельними порядками диференційних моделей. Достовірність висновків та рекомендацій підтверджується апробацією результатів досліджень та відповідним актом їх впровадження у виробництво. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри інформаційних технологій Національного лісотехнічного університету України.

### **Значущість отриманих результатів для науки.**

Розроблені математичні моделі з урахуванням фрактальної структури матеріалу та виявлені з їх застосуванням закономірності деформаційно-релаксійних процесів в капілярно-пористих тілах, а також встановлені особливості протікання цих процесів в деревині в умовах неізотермічного вологоперенесення мають вагомим значення для розвитку теорії нерівноважних деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів з фрактальною структурою.

### **Значущість результатів дисертаційного дослідження для практики.**

Вагомими практичними результатами проведених досліджень є: 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; розроблений алгоритм ідентифікації фрактальних параметрів реологічних моделей; розроблене 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.

**Практичне значення отриманих результатів підтверджено** використанням отриманих результатів дисертаційної роботи для розрахунку тепломасообмінних 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, акт від 23.08.2018 р.) шляхом прогнозування пружних та залишкових значень напружень, розроблення композитних матеріалів на основі деревини.

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» (акт від 17.05.2018 р.).

#### **Повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях.**

За кількістю та якісними показниками публікацій дисертаційна робота відповідає вимогам ДАК МОН України щодо їх кількості. За темою дисертації автором опубліковано 22 праці, з них 6 у виданнях, що входять до переліку фахових видань та 9 публікацій, які включено до наукометричної бази Scopus.

Результати дисертаційної роботи пройшли належну апробацію та доповідалися на 14 Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, а також на Науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу Національного лісотехнічного університету України в період 2015–2018рр.

#### **Структура та зміст дисертації.**

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається зі анотацій, вступу, п'ятих розділів, висновків, п'ятих додатків та переліку літератури із 209 найменувань і викладена на 202 сторінках з яких 124 сторінок основного тексту. Робота містить всі необхідні відомості та інформацію, щоб оцінити наукову проблему, поставленні завдання та способи їх реалізації.

У вступі подано загальну характеристику роботи, зазначено відомості про особистий внесок здобувача та апробацію одержаних результатів дисертаційної роботи. Показано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання, об'єкт і предмет досліджень, відзначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі викладено огляд та подано аналіз літературних джерел за темою дисертації, які відносяться до математичного моделювання тепломасоперенесення та деформування капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, з врахуванням ефектів «пам'яті» у процесі сушіння. Проаналізовано аналітичні та чисельні методи реалізацій математичних моделей в'язко-пружного деформування та тепломасоперенесення у середовищах з фрактальною структурою, динаміка яких описуються дробово-диференціальними рівняннями. Проведено аналіз моделювання складних систем, для котрих характерні ефекти пам'яті, а саме розглянуто вирішення як прямих та і обернених задач, які присвячені пошуку оптимального методу ідентифікації дробово-диференціальних параметрів моделей  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . У цілому критичний огляд з досліджуваної проблематики виконано на достатньо високому рівні у науковому та методологічному аспектах. У розділі з достатньою повнотою висвітлені питання актуальності теми, обґрунтовано мета і завдання наукового дослідження.

Важливим з точки зору постановки задачі є другий розділ дисертації. У ньому на підставі математичного апарату дробового інтегро-диференціювання побудовано двовимірну математичну модель тепломасообмінних процесів капілярно-пористих матеріалів під час сушіння, що дає можливість враховувати еридитарність (*термін автора*), а точніше сталу коерцитивність та ефект динамічної пам'яті матеріалу (*значення коерцитивності пружного гістерезису*). Розроблено алгоритм чисельної реалізації двовимірної математичної моделі теплообмінних процесів капілярно-пористих матеріалів з урахуванням ефектів «пам'яті» під час сушіння, що базується на використанні методу предиктор-коректор та скінченних різниць. Отримані у цьому розділі скінченно-різницевої схеми для апроксимації математичної моделі неізотермічного вологоперенесення капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою у процесі сушіння дають змогу провести реалізацію чисельного методу (показано у розділі 5). Також (у розділі 5) встановлено умови стійкості та збіжності явної різницевої схеми математичної моделі тепло- та вологоперенесення капілярно-пористих матеріалів під час сушіння, які шляхом порівняння узгоджуються із результатами інших досліджень.

У третьому розділі побудовано одновимірні реологічні моделі Фойгта, Кельвіна та Максвелла, які описують деформаційно-релаксаційні процеси з

врахуванням ефекту «пам'яті» деревини під час сушіння. Представлені моделі у диференціальній формі враховуючи використання аналітичного методу перетворення Лапласа та означення, властивості дробових похідних та інтегралів, дали можливість отримати вирази у інтегральній формі, що описують напружено-деформаційний стан капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою у процесі сушіння. Дисертантом також отримано аналітичні вирази для термодинамічних функцій, а саме: ентропію, вільну енергію та функцію розсіювання, які дають можливість дослідити в'язко-пружні середовища в умовах взаємодії з тепломасоперенесенням враховуючи фрактальну структуру матеріалу, а саме синергетичні зв'язки, які є основою дослідження процесу самоорганізації клітин капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою у процесі сушіння.

У **четвертому розділі** дисертації на основі законів Гука та Ньютона, математичного апарату дробових інтегралів та похідних побудовано двовимірні математичні реологічні моделі капілярно-пористих матеріалів у процесі сушіння, які дають можливість врахувати фрактальну структуру матеріалу у різних напрямках анізотропії, початкові значення температури та вологовмісту, тепломеханічні характеристики деревини. Дисертантом розроблено алгоритм чисельної реалізації двовимірних математичних моделей деформаційних процесів капілярно-пористих матеріалів під час сушіння, який дозволяє обчислити компоненти напружено-деформаційного стану деревини з врахуванням ефектів «пам'яті». Також удосконалено метод розщеплення двовимірних ядер повзучості дробово-диференціального типу, що, у свою чергу, у подальшому дозволяє за експериментальними даними одновимірних моделей деформаційно-релаксаційних процесів визначити ядра зсувної та об'ємної повзучості, врахувати значення пружних та залишкових напружень у капілярно-пористому матеріалі під час сушіння. З огляду дисертаційної роботи результати розщеплення використані у задачах параметричної ідентифікації математичних моделей в'язко-пружних середовищ з фрактальною структурою у п'ятому розділі.

**П'ятий розділ** присвячений дослідженню реологічних та теплофізичних характеристик деревини; побудові алгоритму ідентифікації фрактальних параметрів для розглянутих у попередніх розділах реологічних тіл Фойгта, Максвелла та Кельвіна; розробленню інтерфейсу прикладного програмного забезпечення для обчислення вологовмісту, температури, компонент напружено-деформаційного стану деревини під час сушіння; встановленню закономірностей розроблених математичних моделей процесів для періоду сталої та падаючої швидкості сушіння капілярно-пористих матеріалів, враховуючи різні породи деревини та її неоднорідність структури, ефекти

«пам'яті», анізотропію та тепломеханічні характеристики. Отримані закономірності співставленні із теоретичними відомостями, та експериментальними даними, та іншими дослідженнями у часткових випадках.

### **Відповідність змісту автореферату положенням дисертації.**

Автореферат і дисертація оформлені відповідно до вимог ДАК МОН України. Матеріал викладено послідовно та логічно. Автореферат з достатньою повнотою розкриває суть і зміст роботи і не містить інформації, яка відсутня в дисертації.

### **Зауваження до роботи та дискусійні положення.**

1. У першому розділі не достатньо повно проаналізовано методи та алгоритми ідентифікації дробово-диференціальних параметрів за часом та просторовими координатами, які входять у математичні моделі в'язко-пружного деформування та тепломасоперенесення капілярно-пористих матеріалів.
2. У розділі 1 доцільно було б також дослідити складність, неоднорідність, пористість структури деревини, її біологічну природну мінливість реологічних властивостей, наявність гістерезисності - ефекту «пам'яті», можливі синергетичні зв'язки, які притаманні процесу самоорганізації клітин капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою, багатогранну природу просторових кореляцій, а також навести відповідні теоретичні відомості та результати експериментальних досліджень.
3. Реалізація розробленої двовимірної математичної моделі тепломасообмінних процесів капілярно-пористих матеріалів під час сушіння відбувається за рахунок скінченно-різницевого методу предиктор-коректор. Дисертанту необхідно було б обґрунтувати вибір саме такого розбиття часового проміжку на півкроки та скінченно-різницеві апроксимації дробових похідних (для прикладу - чому для дробової похідної за просторовими координатами  $\tilde{\beta}$  використано формулу Грюнвальда-Летнікова).
4. У роботі зазначено, що процес неізотермічного вологоперенесення досліджується для періоду сталої та падаючої швидкостей сушіння капілярно-пористих матеріалів. Необхідно було б алгоритм чисельної реалізації математичної моделі тепломасоперенесення розбити на два випадки: 1) коли вологовміст є сталим; 2) коли початковий вологовміст є змінний та описується формулою (2.4).
5. У висновках до другого розділу вказано, що автором *«побудовано двовимірну математичну модель тепломасообмінних процесів капілярно-пористих матеріалів під час сушіння, що дає можливість врахувати еридитарність та самоорганізацію»*. Для того, щоб наводити подібне твердження необхідно було б навести динаміку температури та вологості з

урахуванням фрактальної структури середовища та без її урахування, навести порівняння із результатами інших дослідників, надати свідомості про клітинні взаємозв'язки та обґрунтувати їх синергетичність для ствердження про самоорганізацію. Висновки 3 та 4 розділів, на жаль, також не позбавлено декларативності.

6. У розділі 3 досліджено та побудовано в'язко-пружні дробово-диференціальні моделі Фойгта, Максвелла та Кельвіна. Доцільно було б обґрунтувати розгляд саме таких трьох моделей та дослідити конкретну модель відносно породи деревини, її структури та реологічних характеристик.

7. Отримані аналітичні вирази для напружень та деформацій дробово-диференціальних реологічних моделей доцільно було б порівняти із класичними результатами теорії лінійних в'язко-пружних середовищ.

8. У четвертому розділі у математичній моделі двовимірного в'язко-пружного деформування початкові та граничні умови (4.12)-(4.13) дорівнюють нулю, що не відповідає практиці. Не зрозуміло також чи буде коректним розроблений алгоритм чисельної реалізації математичної моделі деформування при умові, якщо граничні та початкові значення компонентів деформацій будуть змінними.

9. При проведенні адаптації методу розщеплення двовимірних дробово-диференціальних ядер повзучості необхідно було б вказати узагальнений математичний вигляд ядра, для якого доцільно застосовувати наведений метод розщеплення.

10. Не наведено (розділ 5) закономірностей напружено-деформаційного стану деревини під час сушіння для двовимірних реологічних моделей Максвелла та Кельвіна, хоча у четвертому розділі розроблений алгоритм їх чисельної реалізації.

11. На недостатньому рівні розглянуті питання адекватності запропонованих моделей, питання про наявність ефектів «пам'яті» та самоорганізації, умов їх появи. Недостатньо повно проведено валідацію і верифікацію результатів моделювання тепломасообмінних процесів, деформування деревини враховуючи її неоднорідність структури.

До незначних зауважень слід віднести відсутність у роботі листа позначень, наявність граматичних помилок та помилкових позначень рисунків та таблиць.

Проте, зазначені зауваження не знижують науково-практичної цінності дисертаційної роботи. Наукова новизна, практичне значення результатів та їх апробація аргументовані, кількість публікацій цілком достатня. Автореферат повністю відображає найголовніші риси роботи.



## ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Левкович Мар'яни Володимирівни "Математичне моделювання деформаційних і тепломасообмінних процесів у середовищах з фрактальною структурою" є самостійною, завершеною, науковою роботою, у якій вирішено важливе наукове завдання – підвищення ефективності математичного моделювання процесів тепломасоперенесення та деформування деревини з урахуванням ефекту «пам'яті» у процесі сушіння для зменшення залишкових напружень у деревині й визначення такого напружено-деформаційного стану матеріалу, який не перевищує границі міцності матеріалу.

Вважаю, що розглянута дисертаційна робота за теоретичним рівнем і практичною значущістю відповідає паспорту даної спеціальності та вимогам щодо кандидатських дисертацій, зокрема пп. 9, 11-14 "Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 зі змінами згідно Постанов Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 656 і від 30.12.2015 № 1159, 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:

завідувач кафедри інформаційних технологій і систем,  
Національної металургійної академії України,  
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,  
доктор технічних наук, професор

**О.І. Михальов**

Підпис офіційного опонента,  
доктора технічних наук, професора Михальова О.І. засвідчую:  
Вчений секретар Національної металургійної академії України,  
професор

**О.Ю. Потап**

