

**ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Шиманського Володимира Михайловича  
«Математичне моделювання неізотермічного  
вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у середовищах з  
фрактальною структурою»,

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання  
та обчислювальні методи

**Актуальність теми дисертації.**

Деревина характеризується мінливістю структури фізико-механічних властивостей у напрямках анізотропії, наявністю ефектів «пам'яті» та самоорганізації, складною природою просторових кореляцій. Процес сушіння є енергоємним та довготривалим. Для вирішення задачі вибору раціональних параметрів режиму сушіння, що забезпечать необхідну якість висушеної деревини за найкоротшої тривалості процесу сушіння, необхідне розроблення адекватних математичних моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування капілярно-пористих матеріалів, які б враховувала їх фрактальну структуру. Матеріал деревини характеризується високою гідрофобністю, значною мінливістю фізико-механічних властивостей у напрямках анізотропії, складною природою просторових кореляцій, наявністю ефектів «пам'яті» та самоорганізації. Ці властивості зумовлюють наявність залишкового напружено-деформівного стану, що є одними із основних стримувальних факторів інтенсифікації цього технологічного процесу. Для побудови відповідних математичних моделей, що враховують фрактальні властивості матеріалу деревини доцільним є залучення математичного апарату інтегро-диференціювання дробового порядку. Тому дисертаційна робота Шиманського В.М., яка присвячена математичному моделюванню процесів неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування деревини під час сушіння з урахуванням її фрактальної структури є актуальним науковим завданням.

**Відповідність спеціальності**

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

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

Дисертаційна робота виконана у межах науково-дослідних робіт 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 результатів роботи полягає у наступному:**

- розвинуто теорію неізотермічного вологоперенесення у процесі сушіння деревини з урахуванням впливу фрактальної структури та вплив анізотропії змінних тепломеханічних характеристик на динаміку температури та вологовмісту;
- побудовано нову математичну модель в'язко-пружного деформування матеріалів, які враховують ефекти «пам'яті» для визначення компонентів напружено-деформованого стану і залишкові напруження в процесі сушіння;
- для чисельного розв'язку задач неізотермічного вологоперенесення і в'язко-пружного деформування у середовищах з фрактальною структурою застосовано скінченно-різницеву апроксимацію похідної дробового порядку. Доведено збіжність методу предиктор-коректор заснованого на цих схемах.
- встановлено нові закономірності впливу технологічних параметрів режиму сушіння, анізотропії змінних теплофізичних характеристик на динаміку температури, вологовмісту та компоненти напружено-деформованого стану.
- розроблено методику вимірювання напружень на поверхні висушеного матеріалу та прикладне програмне забезпечення для апроксимації експериментальних даних повзучості деревини за допомогою лінійної комбінації дробово-експоненціальних операторів.

### **Практична цінність результатів.**

Отримані розв'язки є зручними для практичного використання та враховують структуру матеріалу, що є суттєвим для подальшого розрахунку термов'язко-пружного стану в двовимірних елементах конструкцій з врахуванням фрактальної структури. Побудовані математичні моделі, методика дослідження, обчислювальні алгоритми дозволяють їх безпосереднє застосування при розв'язуванні практичних задач, які описуються рівняннями механо-тепломасопровідності капілярно-пористих матеріалів.

Програмне забезпечення для скінченно-різницевого розрахунку деформаційно-релаксаційних і тепло-масообмінних процесів під час сушіння деревини з урахуванням фрактальної структури матеріалу та спосіб вимірювань повних напружень на поверхні висушених пиломатеріалів, розроблені Шиманським В.М., впроваджені виробничо-комерційною фірмою «Ледас-Україна», м.Хуст, Закарпатської області.

Результати наукових досліджень використано та відображено у програмах навчальних дисциплін кафедри інформаційних технологій Національного лісотехнічного університету України: “Математичне моделювання в інформаційних технологіях проектування”, “Обчислювальні методи механіки суцільного середовища”, “Моделювання систем”, “Штучні нейронні мережі”.

## **Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджена:**

- коректним застосуванням математичного апарату для побудови математичних моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у середовищах з фрактальною структурою під час сушіння;
- узгодженням отриманих автором розв'язків з відомими в літературі результатами, знайденими в часткових випадках та отриманими за допомогою чисельних і експериментальних методів;
- апробаціями на наукових семінарах та конференціях, у тому числі міжнародних.

## **Повнота викладу основних результатів у наукових фахових виданнях.**

Основні результати викладено у 21 праці: 6 статей у наукових фахових виданнях, 14 публікацій у матеріалах наукових конференцій. Отримано патент на корисну модель.

## **Короткий зміст роботи і її аналіз**

Розглянута дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків.

Повний обсяг дисертації становить 193 сторінок, основний текст роботи викладено на 149 сторінках. Дисертація містить 66 рисунків та 12 таблиць. Список літератури із 215 найменувань викладено на 25 сторінках.

У **вступі** висвітлено актуальність теми та наукової проблематики дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність результатів отриманих в роботі, показано зв'язок задач з науковими програмами, планами, темами.

В **першому розділі** висвітлено сучасний стан математичного моделювання нестационарних процесів, які можна адекватно описати за допомогою математичного апарату інтегро-диференціювання дробового порядку. Зокрема, в теорії в'язко-пружності для дослідження напружено-деформівного стану з врахуванням необоротних явищ, зумовлених реологічними властивостями матеріалу деревини. Проведено аналіз моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування деревини в процесі сушіння. Проведено огляд літературних джерел, присвячених пошуку розв'язків рівнянь, в яких використовується математичний апарат інтегро-диференціювання дробового порядку.

Проведено аналіз реологічних моделей в'язко-пружного деформування у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів. Залежна від часу в'язко-пружна повзучість при змінних умовах навколишнього середовища може прискорити деградацію жорсткості і міцності деревини та привести до її руйнування. Модель, що описує в'язко-пружні середовища, пов'язує напруження, деформації та їх похідні за часом. Знаходження реологічних

властивостей потребує розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь з похідними дробового порядку. З допомогою аналізу експериментальних даних в одновимірному випадку оцінено параметри реологічних моделей, які далі використовуються для опису властивостей у будь-якому напрямку. Так як класичні моделі не враховують складну структуру та нелінійні властивості матеріалу, використано фрактальні реологічні моделі та математичний апарат інтегро-диференціювання дробового порядку. Деревина є полімерним композиційним матеріалом з в'язко-пружними властивостями. В'язко-пружні властивості є анізотропними і залежать від вологості і температури матеріалу.

Таким чином, зроблено висновок, що для створення адекватних математичних моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у деревині під час сушіння, які б враховували наявні у ній ефекти «пам'яті», самоорганізації та детермінованого хаосу, доцільним є залучення математичного апарату інтегро-диференціювання дробового порядку.

В другому розділі побудовано математичну модель неізотермічного вологоперенесення в процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою. Для визначення динаміки температури та вологовмісту у деревині під час сушіння застосовано скінченно-різницевий метод предиктор-коректор. Побудовано явну та неявну різницеві схеми для системи диференціальних рівнянь тепломасоперенесення, що описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних дробового порядку та відповідними крайовими умови. В якості предиктора використано метод, що ґрунтується на явній різницевій схемі, в якості коректора – на неявній.

Для реалізації математичної моделі розроблено прикладне програмне забезпечення, що базується на використанні скінченно-різницевого методу предиктор-коректор. Враховано мінливість коефіцієнтів тепло- та вологопровідності, тепло- та вологообміну, питомої теплоємності, густини, термоградієнтного коефіцієнта.

В роботі підтверджено адекватність моделі та проведено її верифікацію шляхом співставлення отриманих результатів з відомими експериментальними даними та даними отриманими іншими дослідниками в часткових випадках. Дробовий показник похідної в системі рівнянь визначено з апроксимації експериментальних даних.

На основі аналізу максимальної відносної похибки при різній кількості точок розбиття зроблено висновок, що метод є збіжним по часовій координаті як із застосуванням апарату класичного інтегрування, так і інтегро-диференціювання дробового порядку. На основі порівняння динаміки зміни вологісних полів у процесі сушіння деревини з експериментальними результатами показано, що при використанні традиційної моделі оцінювані поля відрізняються від експериментальних на 6,5%, а з врахуванням фрактальної структури не перевищують 2,5%. За допомогою статистичного критерію на базі коефіцієнта кореляції оцінено кількісне розходження результатів за математичною моделлю та експериментальними даними.

У третьому розділі побудовано математичну модель в'язко-пружного деформування у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою з використанням математичного апарату інтегро-диференціювання дробового порядку. Для отримання чисельних значень компонент напружень використано скінченно-різницевий метод. Експериментальні дані повзучості деревини апроксимовано з допомогою лінійної комбінації дробово-експоненціальних операторів.

Побудовано математичну модель в'язко-пружного деформування капілярно-пористих матеріалів в процесі сушіння з врахуванням анізотропії тепломеханічних характеристик та фрактальної структури матеріалу. Зв'язок між компонентами напружень та деформацій отримано з рівнянь в'язко-пружності, що ґрунтуються на спадковій теорії Больцмана-Вольтерра та задовольняють початковим умовам, що випливають з гіпотези про природний стан тіла. Враховано, що ядро релаксації є резольвентою ядра повзучості, а ядро повзучості визначається з експериментальних даних повзучості деревини.

Чисельні значення вектора переміщень, компонентів деформацій та напружень визначено з допомогою скінченно-різницевого методу. Прийнято, що похідна дробового порядку є похідною у розумінні Рімана-Ліувілля. Побудовано явну та неявну різницеві схеми для апроксимації системи рівнянь, що виражають зв'язок між компонентами напружень та деформацій, співвідношень між переміщеннями та деформаціями, рівнянь рівноваги.

Для знаходження розв'язку задачі в'язко-пружного деформування розроблене програмне забезпечення.

Для дослідження повзучості деревини використано принцип в'язко-пружної спадковості, введений Больцманом, який на підставі принципу суперпозиції отримав інтегральні рівняння. Вольтером виведена форма запису спадкової в'язко-пружності в припущенні, що повна деформація складається з миттєвої, підкоряючись закону Гука, та спадкової, яка пам'ятає історію навантаження матеріалу. Для лінійного напруженого стану зв'язок між напруженнями і деформаціями описується інтегральними рівняннями, які включають ядра повзучості та релаксації. Функція повзучості є ядром інтегрального рівняння для деформації, а функція релаксації є резольвентою ядра повзучості. В теорії спадковості основною проблемою є вибір ядра повзучості. Цей підхід не враховує ефекту «пам'яті». Ю.М. Работнов використав дробово-експоненціальні функції для опису процесу повзучості у таких матеріалах.

Дробовий параметр апроксиманти експериментальних даних повзучості деревини визначено залежно від її температури, вологовмісту та породи з використанням методу найменших квадратів. Вказано, що із збільшенням вологовмісту або температури сосни дробовий параметр значніше відхиляється від одиниці. Найбільший вплив на цей параметр має температура. Чисельно показано, що для «м'яких» порід дробовий параметр апроксиманти більше відхиляється від одиниці ніж для «твердих». Отримано коефіцієнти ядер повзучості та релаксації, необхідні для побудови математичної моделі в'язко-пружного деформування матеріалів з фрактальною структурою.

Підтверджено адекватність моделі в'язко-пружного деформування матеріалів з фрактальною структурою. Співставлено результати, отримані автором з аналогічними, отриманими іншими авторами в часткових випадках. Показано збіжність методу по часовій координаті, оснований на різницевих схемах як для традиційного апарату, так і для апарату інтегро-диференціювання дробового порядку. Таким чином, отримано нові математичні моделі в'язко-пружного деформування капілярно-пористих тіл з фрактальною структурою.

**У четвертому розділі** на основі розробленої математичної моделі неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування капілярно-пористих матеріалів з фрактальною структурою у процесі сушіння досліджено динаміку температури і вологовмісту та реологічних характеристик деревини залежно від породи та параметрів агента сушіння.

Наведено інтерфейс прикладного програмного забезпечення для обчислення задачі неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у процесі сушіння матеріалів з фрактальною структурою, який дозволяє задати всі необхідні вхідні параметри досліджуваного процесу. Побудова графічних залежностей відбувається автоматично.

Досліджено динаміку температури та вологовмісту залежно від анізотропії тепломеханічних властивостей деревини на взірцях різних порід деревини. Встановлено, що нагрівання відбувається експоненціально швидко і встановлюється в стаціонарне значення, рівне температурі середовища. Показано, що з збільшенням температури середовища інтенсивність вологовидалення зростає, а вплив фрактальної структури матеріалу на динаміку вологовмісту зменшується. Вплив фрактальної структури матеріалу більш відчутний при збільшенні відносної вологості агента сушіння. Досліджено вплив геометричних розмірів, породи деревини, анізотропії тепломеханічних властивостей на розвиток напружень під час сушіння на прикладі дубового бруска різних геометричних розмірів.

Проведено аналіз динаміки вологовмісту та компонент напружено-деформівного стану при змінній температурі. Порівняно динаміку досліджуваних величин за одно- та двоступеневого режиму сушіння. Зроблено висновок, що двоступеневий режим сушіння є ефективнішим, ніж одноступеневий, так як значна частина зв'язаної вологи видалається під час активності першого ступеня двоступеневого режиму. Фрактальна структура матеріалу виразніше проявляється при пом'якшенні режиму сушіння.

При довготривалих змінах температури та навантаженнях реологічні властивості визначаються законами в'язко-пружності. Для деревини характерною є наявність «пам'яті». Розглянуто розподіл значень ядра релаксації традиційної та фрактальної моделей Кельвіна для різних порід деревини у різних геометричних точках взірця. Показано, що з збільшенням відхилення параметра фрактальності  $\alpha$  від 1 (м'яка деревина) числові значення ядра релаксації зростають швидше в порівнянні з твердішими породами. Різниця між числовими значеннями традиційної моделі для деревини різної породи є меншою, ніж для фрактальної. Показано, що вільна енергія для фрактальної структури зростає до певного значення протягом перших 45

хвилин. Для твердіших порід це значення є більшим, ніж для м'якших. Після чого вона зменшується на незначну величину, а в подальшому повертається до попереднього рівня. Після припинення необоротного процесу вільна енергія прямує до мінімального значення. Отже, в'язко-пружне деформування деревини є необоротним процесом. Досліджено функцію вільної енергії та ентропію (функцію розсіювання) для різних порід деревини для моделей Кельвіна. Враховуючи фрактальну структуру матеріалу, ми враховуємо його неоднорідність та ефекти пам'яті. Дослідження 4-го розділу дозволяють виявляти вплив характеристик матеріалу – зокрема, наявність ефектів «пам'яті» на температуру, вологовміст та напруження під час сушіння.

**У п'ятому розділі** викладено методику визначення напружень у деревині з врахуванням фрактальної структури на основі розробленої математичної моделі неізотермічного вологоперенесення, в'язко-пружного деформування, апроксимаційних залежностей функцій реологічної поведінки за експериментальними дослідженнями, програмну реалізацію моделі та алгоритму чисельного розв'язку. На основі прямого вимірювання повних напружень на поверхні зразка за величиною підведеного механічного зусилля вимірюються напруження та деформації внаслідок зміни вологовмісту та температури матеріалу

### **З висновків, наведених у дисертаційній роботі випливає таке:**

1. В роботі вдосконалено математичну модель неізотермічного вологоперенесення в процесі сушіння деревини, у якій враховано вплив фрактальної структури матеріалу на динаміку температури та вологовмісту для відповідних початкових температури і вологовмісту.

2. Отримано математичну модель в'язко-пружного деформування в середовищах з фрактальною структурою з врахуванням ефекту «пам'яті», що дає змогу оцінити залишкові напруження внаслідок зміни температури і вологовмісту.

3. Застосовано скінченно-різницеву апроксимацію похідної дробового порядку для знаходження чисельного розв'язку неізотермічного вологоперенесення і в'язко-пружного деформування.

4. Розроблено прикладне програмне забезпечення для реалізації математичної моделі неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування

5. Досліджено неізотермічне вологоперенесення та в'язко-пружне деформування деревини, як середовища з фрактальною структурою.

**У додатках подано:** А. Визначення дробового параметра апроксиманти експериментальних даних повзучості деревини;

Б. Розподіл модельованих компонентів напруження при згущенні скінченно-різницевої сітки;

В. Розподіл вологісних полів та компонент напружень при двоступеневому режимі сушіння деревини з урахуванням її фрактальної структури;

Г. Патент на корисну модель;

## Д. Акти впровадження

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

Викладені в авторефераті актуальність теми, мета і завдання дослідження, наукова новизна отриманих результатів та їхнє практичне значення, особистий внесок дисертанта, короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Автореферат оформлений згідно з вимогами ДАК МОН України.

### **Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів.**

Результати, отримані в дисертаційному дослідженні, є внеском у розвиток кількісної теорії неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування для матеріалів з фрактальною структурою. Побудовані нові математичні моделі дозволяють розширити клас розв'язуваних задач теорії сушіння.

### **За змістом роботи зроблено такі зауваження:**

1. У першому розділі доцільно було б повніше розглянути стан математичного моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування деревини у закордонних літературних джерелах.
2. Доведення збіжності скінченно-різницевого методу предиктор-коректор проводиться на основі аналізу відносної похибки для обчислених значень вологовмісту зі згущенням розбиття по часовій координаті. Не досліджено цю похибку за згущення розбиття по просторових координатах та залежно від обчислених значень температури.
3. Не у достатній мірі описано, як саме математична модель неізотермічного вологоперенесення описує режимні параметри процесу сушіння деревини.
4. Не зовсім зрозумілий механізм повторного використання обчислених динамік температури та вологовмісту під час реалізації математичної моделі в'язко-пружного деформування.
5. На недостатньому рівні проведено верифікацію результатів моделювання напружень в процесі сушіння деревини, хоча саме в'язко-пружне деформування деревини в процесі сушіння є предметом досліджень дисертації.
6. Проаналізовано розвиток залишкових напружень протягом перших 48 год. сушіння, проте не досліджено, яким чином їх можна в подальшому мінімізувати.
7. Для аналізу динаміки температури, вологовмісту та компонент напружень використовуються зразки з однаковими початковими температурно

вологісними характеристиками. Доцільно було б проаналізувати взірці із іншою конфігурацією цих параметрів.

- У дисертаційній роботі здійснюється апроксимація експериментальних даних повзучості деревини за допомогою дробово-експоненціальних операторів Работнова. Наводяться значення для дробового параметра цієї апроксиманти, проте значення її інших коефіцієнтів не аналізуються.

#### **Висновок про відповідність дисертації вимогам ДАК МОН України.**

Необхідно зазначити, що зроблені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та достовірності основних результатів і висновків. За актуальністю теми, новизною, науковою і практичною цінністю результатів дисертаційна робота Шиманського В.М. «Математичне моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у середовищах з фрактальною структурою» відповідає діючим вимогам ДАК МОН України і паспорту спеціальності «Математичне моделювання та обчислювальні методи» (технічні науки).

Оформлення дисертації відповідає вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Результати досліджень у повній мірі відображено у фахових наукових виданнях. Робота пройшла достатню апробацію. Дисертаційна робота акуратно оформлена, текст викладено ясно і послідовно.

Дисертаційна робота «Математичне моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у середовищах з фрактальною структурою» є завершеною науковою працею, у якій вирішуються важливі як в науковому, так і в практичному відношеннях задачі, за новизною отриманих результатів та ступенем їх обґрунтованості відповідає вимогам п. 13,14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор Шиманський Володимир Михайлович заслуговує присвоєння йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

#### **Офіційний опонент:**

старший науковий співробітник  
відділу математичного моделювання нерівноважних процесів  
Центру математичного моделювання  
ІППММ ім. Я.С.Підстригача НАН України  
докт.техн.наук, старш. наук. співробітник

*Гайвась*

Б.І. Гайвась

Підпис *Гайвася Б.І.*  
в.о. вченого секретаря *Лешенко (Лешенко Т.М.)*  
22.02 2016

*Лешенко (Лешенко Т.М.)*