

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора фізико-математичних наук, професора

**Костробія Петра Петровича**

на дисертаційну роботу **Борецької Ірини Богданівни**

**“Математичне моделювання конвективного процесу сушіння деревини з урахуванням границі фазових переходів”**, подану на здобуття наукового

ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### **Актуальність теми дисертації**

Кінцевим результатом сучасного деревообробного виробництва є виготовлення продукції з високими показниками якості. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є пошук оптимальних науково-обґрунтованих технологічних режимів процесів сушіння деревини і виготовлення деревних композитних матеріалів. Це можливо лише за умови детального вивчення деформативності деревини у нестационарних температурно-вологісних полях, тому що якісні показники матеріалів визначаються динамікою небезпечних щодо тріщиноутворення і короблення матеріалу технологічних напружень. Саме ці процеси протікають в умовах високої мінливості, структурних і фізичних властивостей матеріалу, та є основними стримуючими факторами для розроблення нових та вдосконалення існуючих технологій сушіння деревини.

Процес сушіння капілярно-пористих матеріалів супроводжується поглибленням зони випаровування вологи у середину матеріалу. Наявність рухомої границі на межі розділу фаз з різними теплофізичними і механічними характеристиками суттєво ускладнює математичні моделі деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів під час сушіння капілярно-пористих матеріалів. Моделювання тепломасоперенесення з фазовими переходами у процесі сушіння зводяться до розв'язання задач Стефана і є найскладнішими навіть для незначних змін густини матеріалу у зоні випаровування. Тому актуальним завданням є побудова математичних моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язкопружного деформування у капілярно-пористих матеріалах у процесі конвективного сушіння з рухомими межами фазового переходу.

Таким чином, тема, мета та завдання, поставлені у дисертаційній роботі Борецької І.Б., є безумовно **актуальними**.

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

Ці дослідження 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, 2010-2012 рр.; “Програмно-алгоритмічні засоби та інформаційні технології автоматизації досліджень енергоефективних процесів сушіння деревини ”, № держреєстрації 0110U000657, 2011-2012 рр.; “Математичне моделювання нерівноважних деформаційно-релаксаційних і тепломасообмінних процесів у середовищах з фрактальною структурою”, № держреєстрації 0115U002316, 2015-2017 рр. У рамках виконання вищенаведених робіт Борецька І.Б. отримала результати, які становлять наукову новизну дисертаційних досліджень.

### **Структура та зміст дисертації**

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та переліку літератури із 204 найменувань і викладена на 208 сторінках з яких 138 сторінок основного тексту. Робота містить всі необхідні відомості та інформацію, щоб оцінити наукову проблему, поставлені 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 досліджень, відзначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Також наведено дані про особистий внесок дисертанта та апробацію одержаних результатів дисертаційної роботи.

**У першому розділі** описано огляд та проведено аналіз відомих в літературі підходів до математичного моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язкопружного деформування у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема з урахуванням рухомих меж зони випаровування вологи. Розглянуто



можливі підходи до моделювання процесів тепломасоперенесення у матеріалах під час сушіння з врахуванням руху поглиблення зони випаровування. Проаналізовано аналітичні та числові методи реалізації математичних моделей тепломасоперенесення з фазовими переходами. У цілому критичний огляд з досліджуваної проблематики виконано на достатньо високому рівні у науковому та методологічному аспектах. Розділ насичений необхідною інформацією, яка висвітлена з достатньою повнотою та переконує в актуальності проведених досліджень, формулюванні мети і завдань.

Важливим щодо вирішення поставлених у роботі задач є **другий розділ**, у якому на основі термодинаміки незворотних процесів та законів течіння рідин і газів дисертантом побудовано нову нелінійну математичну модель вологоперенесення під час сушіння капілярно-пористих матеріалів для нестационарних режимів з врахуванням рухомих границь зони випаровування вологи, яка, на відміну від інших, дозволяє отримати аналітичні залежності для дослідження температурно-вологісних полів у висушуваній деревині у довільний момент часу сушіння залежно від координати межі фаз.

Отримано аналітичний розв'язок диференціальних рівнянь нелінійної математичної моделі вологоперенесення при сушіння капілярно-пористих матеріалів з врахуванням рухомих границь зони випаровування вологи та отримано аналітичні залежності для дослідження температурно-вологісних полів у висушуваній деревині у довільний момент часу сушіння залежно від координати межі переходу фаз. Також досліджено вплив термодифузії, теплофізичних характеристик матеріалу, режимних параметрів агента сушіння на температуру фазових переходів. Встановлено, що температура фазового переходу є нелінійною функцією від коефіцієнтів теплообміну та масообміну матеріалу, коефіцієнта проникності, динамічної в'язкості газової суміші, теплопровідності, відносної насиченості та функції керування температурою агента сушіння, питомої теплоти пароутворення. Отримані аналітичні залежності для визначення часу, при якому відносна насиченість досягає зони випаровування вологи та повного часу сушіння.

Дисертантом здійснювалася перевірка адекватності математичних моделей за допомогою порівняння результатів чисельного моделювання з наявними експериментальними даними перенесення вологості у висушуваній деревині. Також

результати моделювання співставленні з відомими розрахунковими моделями на початковому етапі нагрівання деревини. Аналіз результатів свідчить про задовільне узгодження числових та експериментальних значень.

Для інтенсифікації процесу сушіння необхідно підвищувати жорсткість режимів сушіння, а це вимагає дослідження впливу термодифузії на масоперенесення вологи при сушінні деревної пластини. Тому у **третьому розділі** побудована математична модель масоперенесення в процесі конвективного сушіння капілярно-пористих матеріалів при більш жорстких температурних режимах. Встановлені розрахункові співвідношення для визначення температури фазового переходу з урахуванням градієнтів перенесення та часу, для якого відносна насиченість досягає границь межі фаз. Коефіцієнти отриманого рівняння є функціями координати межі фаз, питомої температури пароутворення, коефіцієнтів тепло та масообміну коефіцієнтів провідності та динамічної в'язкості газу, параметрів режиму сушіння, відносних насиченостей вологою поверхні шару і сушильного середовища та градієнта температури, середньої температури скелету. Слід зазначити також і те, що дістав подальший розвиток аналітично-числовий метод для визначення неізотермічного вологоперенесення при нестационарних режимах процесу сушіння з врахуванням динаміки зміни границі фазового переходу.

Запропонований дисертантом підхід та встановлені закономірності впливу термодифузії на поглиблення зони випаровування вологи у висушуваних матеріалах можуть бути використані для розроблення раціональних технологій сушіння капілярно-пористих матеріалів із забезпеченням необхідних показників якості.

Важливим з точки зору математичного моделювання є **четвертий розділ** дисертації. У ньому вперше побудовано двовимірну математичну модель процесу конвективного сушіння анізотропних пористих матеріалів з урахуванням руху границі межі фаз. Визначено вплив головних компонентів та орієнтації головних осей тензора теплоперенесення на нестационарні температурні поля у призматичному брусі прямокутного поперечного перерізу з урахуванням руху границь межі фаз. Цей розділ дисертації є дуже важливий, оскільки в ньому розроблений аналітично-числовий метод для визначення теплоперенесення в ортотропній пластині з рухомою границею межі фаз та встановлення рухомих меж фаз у



прямокутній області з врахуванням головних осей анізотропії, а також побудовані алгоритми для числового аналізу нелінійної математичної моделі при змінних температурних режимах середовища. Заслугою дисертанта є і те, що їй вдалося побудувати наближений аналітико-числовий розв'язок задачі для триетапного режиму процесу сушіння, а також отримати формули для визначення температури у довільній точці деревного бруса у довільний момент часу сушіння залежно від координати площини фазового переходу, зміни температури та вологості агента сушіння.

Завершальним є **п'ятий розділ** дисертації, у якому побудована математична модель реологічної поведінки деревної пластини з врахуванням зони випаровування вологи, яка поділяє пластину на дві області з різними структурними і реологічними властивостями. Також отримано узагальнення гіпотези збереження незворотних деформацій на випадок в'язкопружного деформування капілярно-пористих матеріалів з врахуванням фазового переходу на границі випаровування вологи. Практично цінним є розроблення дисертантом об'єктно-орієнтованого прикладного програмного забезпечення для чисельної реалізації математичних моделей неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у середовищах з врахуванням руху зони випаровування.

### **Достовірність одержаних результатів, обґрунтованість 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 і математичної фізики для розроблення математичних моделей; методи інтегральних перетворень, скінченних різниць, варіаційні та апроксимаційні методи для реалізації математичних моделей; методи об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування програмного забезпечення; методи статистичного моделювання для перевірки адекватності моделей. Окремі результати дисертації узгоджені з відомими в літературі експериментальними та теоретичними результатами для часткових випадків. 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 НЛТУ України.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується також апробацією на наукових конференціях, опублікуванням 8 статей у виданнях, що входять до переліку фахових видань України, однієї статті у закордонному періодичному виданні та 2 публікації, які включено до наукометричної бази Scopus.

Серед **нових наукових результатів** слід відмітити те, що у дисертаційній роботі Борецької І.Б.

- побудовано нову нелінійну математичну модель неізотермічного вологоперенесення під час сушіння капілярно-пористих матеріалів з врахуванням рухомої границі зони випаровування вологи, яка, на відміну від інших, дає змогу визначити зміну температурно-вологісних полів у висушуваній деревині у довільний момент часу залежно від координат межі фаз, теплофізичних характеристик матеріалу, нестационарних режимних параметрів агента сушіння.

- отримав подальший розвиток аналітично-числовий метод для визначення неізотермічного вологоперенесення, тривалості процесу сушіння для нестационарних багатоетапних режимів агента сушіння з врахуванням зміни границі фаз та температури фазового переходу.

- побудовано нову двовимірну нелінійну математичну модель процесу конвективного сушіння анізотропних пористих матеріалів з урахуванням руху границі фаз, яка дозволяє врахувати вплив головних компонентів та орієнтації осей тензора теплоперенесення на нестационарні температурні поля у призматичному тілі;

- вперше узагальнено та обґрунтовано аналітично-числовий метод для визначення теплоперенесення в ортотропній пластині з рухомою границею розподілу фаз у процесі конвективного сушіння та встановлення зміни рухомих меж фаз у прямокутній області з врахуванням анізотропії теплофізичних характеристик матеріалу;

- побудовано нову математичну модель в'язкопружного деформування капілярно-пористої пластини в умовах зміни вологоперенесення з врахуванням зони випаровування вологи та отримано узагальнення гіпотези збереження незворотних



деформацій на випадок в'язкопружного деформування капілярно-пористих матеріалів.

**Практична цінність отриманих результатів підтверджена** створенням прикладної програмної системи для моделювання та аналізу розподілів температури, вологовмісту та компонентів в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння з урахуванням рухомих меж зони випаровування вологи, що дає можливість обґрунтування режимних змінних параметрів конвективного сушіння деревини за умови забезпечення необхідної якості продукції та впровадженням розробленої програмної системи для раціонального вибору процесу сушіння на ТзОВ «Суховільський ДОК» (с. Суховоля, Городоцький р-н, Львівська обл., акт від 21.05.2018 р.).

Результати наукових досліджень використано в навчальному процесі та відображено у навчальних програмах дисциплін “Моделювання систем”, “Проектування САЕ/CAD/CAM систем” та “Автоматизовані системи моделювання об'єктів і процесів” (акт про впровадження 11.12.2017 р.).

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

За темою дисертації автором опубліковано 22 праць, з них 8 у виданнях, що входять до переліку фахових видань України, одна стаття у закордонному науковому періодичному виданні та 2 публікації, які включено до наукометричної бази Scopus. Результати дисертаційної роботи пройшли належну апробацію та доповідалися на 12 міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, а також на наукових семінарах з 2008 по 2018 рр. Перераховані роботи достатньо повно відображають результати проведених автором досліджень.

### **Оформлення дисертації та автореферату**

Викладені в авторефераті актуальність теми, мета та завдання дослідження, наукова новизна одержаних результатів та їх практичне значення, а також короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Автореферат оформлено згідно з вимогами.

Дисертація Борецької Ірини Богданівни відповідає діючим вимогам щодо оформлення дисертаційних робіт. Робота написана грамотно, послідовно та має завершену логічну структуру.

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 у частині отримання нових математичних моделей тепломасоперенесення і в'язко-пружного деформування під час конвективного сушіння анізотропних капілярно-пористих матеріалів з урахуванням рухомої границі випаровування вологи; у частині ідентифікація математичних моделей – визначено співвідношення для ідентифікації рухомих меж зони випаровування. Згідно напрямку досліджень «Розвиток, ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження, проектування, виготовлення та експлуатації об'єктів нової техніки й нових технологій», зокрема модифікація й спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності і алгоритмів, що враховують особливості реальних технічних та технологічних задач у частині узагальнення та обґрунтування аналітико-числового методу для реалізації математичних моделей тепломасоперенесення з рухомою границею фазового переходу у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів з урахуванням анізотропії теплофізичних характеристик матеріалу та встановлення зміни рухомих меж зони випаровування залежно від змінних технологічних параметрів агента сушіння.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

Проте, дисертаційна робота Борецької І.Б. містить і ряд недоліків. Зокрема:

1. У першому розділі потребують ширшого аналізу наявні методи ідентифікації зони випаровування у капілярно-пористих матеріалах у процесі термічного оброблення з урахуванням конкретних постановок задач.
2. Наведена у другому розділі лінеаризована математична модель масоперенесення (2.35)-(2.38) дозволяє отримати важливі технологічні залежності визначення повного



часу конвективного сушіння, та час, при якому відносна насиченість досягає значення рухомої межі зони випаровування. Однак у роботі якісного обґрунтування проведення такої лінеаризації немає.

3. У математичних моделях тепломасоперенесення температуру агента сушіння представлено у вигляді поліному експоненціальних функцій. Однак у граничних умовах потребують детального опису і інші характеристики теплоносія сушіння, зокрема відносної вологості і швидкості. Наявність таких залежностей дозволили б впровадити дії щодо оперативного регулювання технологічним процесом сушіння деревини.

4. Для побудови аналітико-числового методу визначення рухомих меж в ортотропній пластині автором наведене модифіковане рівняння теплового балансу. Однак процеси випаровування і конденсації, як правило, супроводжуються суттєвою зміною густини речовини та зростанням тиску у приміжових зонах випаровування. Наведене рівняння не враховує цих процесів, а в роботі не наведено міркувань щодо їх знехтування.

5. У дисертації зустрічаються незначні описки та відсутність посилань.

Зазначені зауваження не знижують значимості дослідження та не зменшують загального позитивного враження щодо новизни та якості дисертаційної роботи в цілому.

### **Загальна оцінка роботи та висновок**

Дисертаційна робота Борецької Ірини Богданівни “Математичне моделювання конвективного процесу сушіння деревини з урахуванням границі фазових переходів” є самостійною, завершеною, науковою роботою, у якій вирішено важливу наукову задачу математичного моделювання неізотермічного вологоперенесення та в’язкопружного деформування при конвективному сушінні капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, з врахуванням руху зони випаровування для нестационарних режимів агента сушіння та розроблення ефективних аналітико-числових методів їх реалізації, що має важливе значення для обґрунтування раціональних режимів та підвищення ефективності технологічного процесу за умови забезпечення необхідної якості продукції.

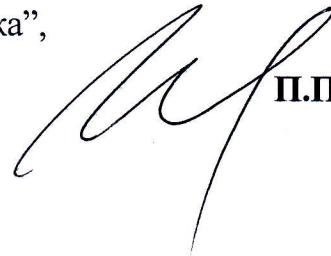
Розглянута дисертаційна робота за теоретичним рівнем і практичною значущістю відповідає паспорту даної спеціальності та вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій, зокрема п.9, 11-14 “Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №568, а її автор, **Борецька Ірина Богданівна**, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

### Офіційний опонент

завідувач кафедри прикладної математики

Національного університету “Львівська політехніка”,

доктор фізико-математичних наук, професор



**П.П. Костробій**

*Підпис доктора фіз.-мат. наук, професора Костробія Петра Петровича засвідчую.*

Вчений секретар

Національного університету «Львівська політехніка»

доцент



**Р.Б. Брилинський**