

ВІДГУК

**офіційного опонента – доктора технічних наук, професора
Гребеніка Ігоря Валерійовича
на дисертаційну роботу Борецької Ірини Богданівни
“Математичне моделювання конвективного процесу сушіння
деревини з урахуванням границі фазових переходів”,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне
моделювання та обчислювальні методи**

Актуальність теми

Вибір раціональних технологій конвективного сушіння матеріалів із забезпеченням максимальних інтенсивностей процесів та мінімальних енергетичних ресурсів є важливою задачею. Складність процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини, зумовлюється протіканням взаємопов'язаних фізичних явищ тепломасоперенесення і деформування в умовах високої мінливості структурних та фізичних властивостей гігроскопічних тіл.

Сучасний підхід до математичного моделювання тепломасоперенесення у процесі сушіння матеріалів базується на застосуванні теорії теплопровідності. Вона дозволяє використовувати класичні методи математичної фізики для розв'язання конкретних крайових задач. Однак для врахування фазових переходів, зокрема, рухомої зони випаровування всередині матеріалу, необхідно застосування методів дослідження неklasичної теплопровідності. Тому розроблення математичних моделей тепломасообінних процесів під час сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема, деревини, з урахуванням руху границь фазових переходів, дослідження закономірностей їх зміни дають можливість вдосконалення існуючих та розроблення нових технологій конвективного сушіння.

Виходячи з цього, 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. Зазначеній проблемі присвячена робота Борецької Ірини Богданівни, що характеризує дисертаційну роботу як актуальну.

Відповідність спеціальності.

Зміст дисертаційної роботи (мета, задачі досліджень, методи досліджень, висновки, область використання, впровадження) відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, в галузі технічних наук.

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 багатозначних 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.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає в побудові нової нелінійної математичної моделі 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 координати фазового переходу, теплофізичних характеристик матеріалу, нестационарних режимних параметрів агента сушіння; розвитку аналітично-числового методу для визначення неізотермічного вологоперенесення, тривалості процесу сушіння для нестационарних багатоетапних режимів агента сушіння з врахуванням зміни границі фазового переходу та температури фазового переходу; побудові нової двовимірної нелінійної математичної моделі процесу конвективного сушіння анізотропних пористих матеріалів з врахуванням руху границі фазових переходів, яка дозволяє врахувати вплив головних компонентів та орієнтації осей тензора теплоперенесення на нестационарні температурні поля у призматичному тілі; 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.

Дисертантом узагальнено та обґрунтовано аналітично-числовий метод для визначення теплоперенесення в ортотропній пластині з рухомою границею фазового переходу у процесі конвективного сушіння та встановлення зміни рухомих меж фазового переходу у прямокутній області з врахуванням анізотропії теплофізичних характеристик матеріалу.

Значення результатів роботи для науки і практики.

Результати проведеного дослідження склали основу для розробки аналітико-числових методів, алгоритмічного та програмного забезпечення, що можуть бути використані для створення систем автоматизованого розрахунку температури, вологовмісту, тиску та компонентів напружень під час сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема деревини з врахуванням зони випаровування вологи та змінних технологічних параметрів агента конвективного сушіння.

Результати роботи впроваджено у діяльність ТзОВ «Суховільський ДОК» (с. Суховоля, Городоцький р-н, Львівська обл., акт від 21.05.2018 р.) для 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.

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 і рекомендацій

Обґрунтованість та достовірність отриманих автором результатів базуються на комплексному дослідженні з використанням адекватних об'єкту та предмету дослідження. Воно охоплює комплекс нелінійних математичних моделей та аналітико-числових методів аналізу процесу конвективного сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема, деревини, з рухомими межами випаровування вологи.

Достовірність результатів обумовлюється сучасними методами досліджень, зокрема, методами механіки спадкових середовищ і математичної фізики для розроблення математичних моделей; методами інтегральних перетворень, скінченних різниць; варіаційними та апроксимаційними методами для реалізації математичних моделей; методами об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування програмного забезпечення; методами статистичного моделювання для перевірки адекватності моделей.

Усі наукові результати дисертаційної роботи належать особисто здобувачеві. Висновки дисертації ґрунтуються на основі власних досліджень і повністю відображають закономірності, які були виявлені в результаті проведених досліджень, підтверджуються апробацією результатів досліджень та відповідним актом впровадження у виробництво. Тому є підстави вважати наукові положення та висновки обґрунтованими, узгодженими з метою та задачами дисертаційної роботи.

Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи

Апробація результатів дисертаційного дослідження Борецької Ірини Богданівни є достатньою. За темою дисертації опубліковано 22 наукові праці, зокрема: 10 статей, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях України та закордонному періодичному виданні; 12 публікацій у

матеріалах наукових конференцій, 2 праці включено до наукометричної бази Scopus.

Короткий зміст роботи і її аналіз

Дисертаційна робота Борецької Ірини Богданівни загальним обсягом 208 сторінок складається зі вступу, 5 розділів, висновків, переліку використаної літератури із 204 найменувань і додатків. Основний текст, викладений на 138 сторінках, містить 56 рисунків та 5 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, охарактеризовано наукову новизну і практичне значення результатів, наведено дані про публікації та апробацію результатів досліджень, відзначено особистий внесок автора, описано структуру та обсяг роботи.

В оглядовій частині (**1-й розділ**) проведено аналіз літератури в області математичного моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язкопружного деформування у процесі сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема з урахуванням рухомих меж зони випаровування вологи. Проаналізовано різні підходи у моделюванні процесів тепломасоперенесення у матеріалах під час сушіння з врахуванням руху поглиблення зони випаровування.

Встановлено доцільність побудови математичних моделей неізотермічного вологоперенесення і дослідження впливу термодифузії на масоперенесення і деформування при сушінні капілярно-пористих матеріалів з врахуванням руху зони випаровування для нестационарних режимів сушіння та розроблення ефективних аналітико-числових методів їх реалізації.

У **другому розділі** для вирішення поставлених завдань автором побудовано математичну модель тепломасоперенесення у процесі сушіння з врахуванням границі фазового переходу для капілярно-пористої деревної пластини. Пластина віднесена до декартової системи координат. У процесі сушіння пластина контактує з газовим середовищем, яке є сумішшю сухого повітря та пари.

Математична модель процесу тепломасоперенесення у пластині під час сушіння з врахуванням зміни у часі границі фазового переходу ґрунтується на рівняннях, що складають нелінійну математичну модель, яка описує конвективний процес сушіння капілярно-пористого тіла (пластини) з врахування рухомої границі фазових переходів. Також, автором розроблено аналітико-числовий метод реалізації математичної моделі для нестационарного режиму агента сушіння.

Перевірка адекватності математичних моделей здійснювалася 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 задовільну збіжність чисельних та експериментальних значень.

У **третьому розділі** здійснено математичне моделювання впливу термодифузії на масоперенесення вологи при сушінні деревної пластини. Математична модель масоперенесення в осушеній зоні пластини при врахуванні дифузійного, конвективного та теплового потоків описується системою диференціальних рівнянь.

Встановлено закономірності впливу термодифузії на поглиблення зони випаровування вологи у висушуваних матеріалах, що можуть бути використані для розроблення раціональних технологій сушіння капілярно-пористих матеріалів із забезпеченням необхідних показників якості.

Дістав подальший розвиток аналітично-числовий метод для визначення неізотермічного вологоперенесення при нестационарних режимах процесу сушіння з урахуванням динаміки зміни границі фазового переходу.

Отримано важливі з точки зору практичного використання розрахункові співвідношення для визначення температури фазового переходу з урахуванням градієнтів перенесення та часу, для якого відносна насиченість досягає границь фазового переходу та повного часу сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема, деревини.

У **четвертому розділі** дисертації побудовано двовимірну математичну модель процесу конвективного сушіння анізотропних пористих матеріалів з урахуванням руху границі фазових переходів. Визначено вплив головних компонентів та орієнтації головних осей тензора теплоперенесення на нестационарні температурні поля у призматичному брусі прямокутного поперечного перерізу з урахуванням руху границь фазових переходів.

Розроблено аналітично-числовий метод та побудовано алгоритми для реалізації математичної моделі при змінних температурних режимах середовища. Таким чином, автором адаптовано рівняння теплового балансу з урахуванням рухомої межі фазового переходу.

Це дозволило розробити аналітично-числовий метод для розрахунку теплоперенесення в ортотропній пластині з рухомою границею фазових переходів та отримати рівняння для визначення рухомих меж фазового переходу у ортотропній пластині. Побудовано алгоритм для визначення рухомої межі зони випаровування у деревному брусі та досліджено закономірності її зміни залежно від ортотропних теплофізичних характеристик матеріалу, температури і відносної вологості агента сушіння.

Побудована математична модель є досить складною. Фізико-механічні характеристики, які входять у модель, залежать від часу і умов протікання процесу гідротермічної обробки матеріалу і від багатьох інших факторів, які складно врахувати. Математичну модель може бути використано для аналізу практично важливого для технології сушіння класу задач визначення та регулювання процесів тепломасоперенесення у капілярно-пористих матеріалах, зокрема, деревини.

П'ятий розділ присвячено побудові математичної моделі реологічної поведінки деревної пластини з урахуванням зони випаровування вологи, яка поділяє пластину на дві області з різними структурними і реологічними властивостями залежно від зміни межі фазового переходу.

Як результат, автором побудовано математичну модель в'язкопружного деформування капілярно-пористої пластини в умовах зміни вологоперенесення з урахуванням зони випаровування вологи. Встановлено закономірності розвитку компонент напружень у деревині під час сушіння залежно від зміни температури, вологовмісту, зони випаровування вологи та технологічних параметрів агента сушіння. Показано немонотонність характеру розтягуючих напружень у часі для різних значень зон випаровування та зміщення їхнього максимуму в середину пластини зі збільшенням тривалості сушіння. Виявлено наявність стискаючих напружень у висушеній зоні пластини для початкових стадій процесу сушіння.

Наведено практичні рекомендації щодо вибору режиму сушіння. Вони спрямовані на визначення раціональних параметрів агента сушіння та регулювання процесу переходу до наступного режиму сушіння, що в свою чергу призводить до підвищення якості висушеної деревини.

Дисертаційна робота завершується висновками і рекомендаціями, які логічно витікають з виконаних досліджень.

Відповідність змісту автореферату положенням дисертації

Автореферат дисертації оформлений згідно існуючих вимог і за змістом повністю відповідає дисертаційній роботі. Він з достатньою повнотою розкриває зміст і суть роботи.

Дисертація Борецької Ірини Богданівни відповідає діючим вимогам щодо оформлення дисертаційних робіт. Матеріал викладено послідовно та логічно.

Зауваження до роботи

1. У другому та третьому розділах роботи для моделювання процесів тепломасоперенесення у капілярно-пористих матеріалах при конвективному сушінні автором використовується поняття насиченості вологою і відносної вологості (або вологовмісту). Доцільно було б показати зв'язок та відмінності між цими величинами, зокрема, для деревини.

2. Для аналізу результатів моделювання, зокрема, динаміки температури, вологовмісту та компонент напружень у процесі сушіння використовуються деревні взірці з однаковими початковими температурно-вологісними характеристиками. Доцільно було б проаналізувати взірці із різними значеннями цих параметрів.

3. Отримане у четвертому розділі диференціальне рівняння (4.45) для визначення рухомих меж фазового переходу є суттєво нелінійним, оскільки величини виражаються через інтегральні вирази, межі інтегрування яких залежать від рухомих меж фазового переходу. Тому доцільно було б для числового аналізу навести апроксимаційні вирази для таких величин залежно від границі фазового переходу.

4. Для обґрунтування достовірності отриманих результатів на основі моделей процесу конвективного сушіння деревини варто було б показати зміну вологісних полів деревини на кожній ступені технологічного режиму для випадку детермінованих значень фізичних властивостей деревини й агента сушіння. Це дало б змогу порівнювати результати моделювання з існуючими результатами для сталих значень режимних параметрів.

5. У п'ятому розділі наведені результати впливу тепломасоперенесення на напружено-деформівний стан деревної пластини у процесі сушіння залежно від комплексних величин теплофізичних і механічних властивостей. Однак у розділі відсутні обґрунтування і рекомендації щодо вибору таких залежностей та їх подальшого використання у технологічному процесі сушіння деревини.

6. Відомо, що капілярно-пористі матеріали характеризуються високою гідрофільністю і відносяться до класу фізично-нелінійних реологічних полімерів. Доцільно було б проаналізувати в роботі реологічну поведінку матеріалів з урахуванням механізмів переродження деформації залежно від зміни умов сушіння і різних умов навантаження матеріалу, які мають домінуючий вплив на якість таких матеріалів в процесі сушіння.

7. Розроблені математичні моделі дозволяють виявити закономірності впливу процесу тепломасоперенесення на динаміку деформацій і напружень у деревині в процесі сушіння. Доцільно було б дослідити питання щодо впливу напружено-деформівного стану осушеної деревини на процес зміни температури і вологості, особливо зважаючи на те, що деревина, як і інші капілярно-пористі матеріали, характеризується значним всиханням (зміною геометричних розмірів).

Виявлені недоліки не знижують наукової і практичної цінності дисертації.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Ірини Богданівни Борецької є завершеною науковою роботою, в якій розв'язано наукову задачу математичного

моделювання неізотермічного вологоперенесення та в'язко-пружного деформування у капілярно-пористих матеріалах, що має важливе значення для розроблення та обґрунтування енергоощадних технологій гідротермічного оброблення деревини за умови забезпечення необхідної якості продукції.

Дисертаційна робота відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи з технічних наук та вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій, зокрема, п. 9, 11-14 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. Її автор, Борецька Ірина Богданівна, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за цією спеціальністю.

Офіційний опонент

завідувач кафедри системотехніки
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор технічних наук, професор

І. В. Гребеннік

Підпис проф. Гребенніка І.В. засвідчую.
Учений секретар ХНУРЕ



І.В. Магдаліна