

РЕЦЕНЗІЯ

професора, доктора фізико-математичних наук, професора кафедри вищої математики Інституту прикладної математики та фундаментальних наук, Національного університету «Львівська політехніка» Мусія Романа Степановича на дисертаційне дослідження Дмитрука Анатолія Андрійовича «МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ З УРАХУВАННЯМ ФАЗОВИХ ЗМІН», представлене на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 *Прикладна математика*, галузь знань 11 *Математика та статистика*

Актуальність теми виконаної роботи та зв'язок із відповідними планами галузей науки. Незважаючи на значні успіхи в галузі математичного моделювання процесів сушіння капілярно-пористих тіл природного чи штучного походження, на сьогодні все ще існує об'єктивна необхідність побудови математичних моделей, які б точніше описували ці процеси в багатокомпонентних системах таких тіл. Це стосується врахування локальної структури капілярно-пористих тіл, взаємовпливу процесів тепломасопереносу в області тіла та на його поверхні, а також впливу агента сушіння на процеси фазових переходів в межах цілої системи з метою найбільш повного врахування існуючих експериментальних даних для усталених та імпульсних гідродинамічних режимів сушіння та розроблення ефективних аналітико-числових методів їх реалізації. Саме ця важлива проблема стала предметом дослідження дисертаційної роботи «Математичне моделювання процесів сушіння багатокомпонентних капілярно-пористих тіл з урахуванням фазових змін», яка присвячена вдосконаленню математичних моделей тепломасопереносу та напружено-деформованого стану багатокомпонентних тіл капілярно-пористої структури з урахуванням фазових змін під час сушіння.

Загальні підходи до побудови математичних моделей тепломасопереносу висвітлені в монографіях Я.Й. Бурака, А.Я. Бомби, Б.І. Гайвась, Я.І. Соколовського, Є.Я. Чаплі, О.Ю. Чернухи та ін. Математична модель сушіння капілярно-пористих тіл, як частковий випадок моделі тепломасопереносу в трифазному деформівному пористому вологому середовищі з фазовими переходами, вивчає еволюцію температури, вологовмісту, тиску, кінематичні характеристики процесу, чутливість до впливу параметрів і умов на границі. Вологе пористе тіло розглядається як трифазне середовище, що містить скелет, рідину і газ (гомогенну пароповітряну суміш), які заповнюють пори або проміжки між зернами. Основи теорії сушіння та моделювання процесу, зокрема, викладені в працях Н.Н. Грінчика, О.В. Ликова, П.П. Луцика та ін.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної математики Національного університету «Львівська політехніка» та узгоджується з науковими напрямами кафедри, що охоплюють дослідження складних

систем, зокрема математичне моделювання, розробку алгоритмів та програмне забезпечення. Дослідження є частиною ширшого наукового напрямку галузі знань 11 Математика та статистика, спрямованого на вдосконалення математичних моделей і методів.

Тему дисертації затверджено (протокол №61 від 12.06.2023 р.) Вченою радою Навчально-наукового інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка».

Оцінка змісту, наукового рівня дисертації та публікацій здобувача. Повнота викладу результатів у опублікованих працях. Відповідно до мети та поставлених у роботі завдань здобувач здійснив **грунтовний аналіз** наявних у літературі фізико-математичних моделей, методологій та підходів для опису процесів сушіння капілярно-пористих тіл. Встановлено, що застосування термодинаміки нерівноважних процесів є ключовим для моделювання складних фізичних явищ у капілярно-пористих тілах. Проаналізовано застосування гіпотези локальної термодинамічної рівноваги для опису процесів сушіння, де фізичний стан малих підобластей визначається спряженими параметрами, такими як температура, тиск, об'єм та концентрація.

Аналіз гомогенізаційного підходу показав, що він дозволяє ефективно описувати неоднорідні капілярно-пористі структури на макроскопічному рівні. Якщо характерні віддалі, на яких відбуваються зміни параметрів системи, є більшими за характерні розміри неоднорідностей, то використання принципу гомогенізації неоднорідної структури є можливим. Встановлено, що використання середніх ефективних коефіцієнтів теплопровідності, дифузії та пружності значно спрощує опис процесів тепломасопереносу. Було також вказано, що гомогенізація забезпечує точне врахування впливу мікроструктури на глобальні процеси сушіння, особливо для матеріалів із зернистою та волокнистою структурою.

Дослідження літератури показало, що стохастичні методи є ефективними для визначення властивостей середовищ із випадковими неоднорідностями. Було встановлено, що ці підходи дозволяють моделювати вплив статистично розподілених параметрів, таких як розміри пор чи зерен, на процеси тепломасопереносу та фазових переходів. Крім того, стохастичні рівняння дозволяють враховувати вплив мікроструктурних неоднорідностей на динаміку масопереносу, що є важливим для точного прогнозування процесів сушіння в реальних умовах.

Здобувач **обґрунтував** використання підходів теорії сумішей та методів механіки багатошвидкісних систем для моделювання багатофазності та багатокомпонентності систем капілярно-пористих тіл. При моделюванні процесів тепломасопереносу застосовано комбіновані моделі, що враховують специфіку фазових переходів та локальних властивостей компонент системи, а для розв'язання задач механіки —

методи гомогенізації неоднорідної структури. Це дозволило отримати фізичні співвідношення для опису поведінки системи в цілому, базуючись на припущеннях про характер часових і просторових змін досліджуваних полів.

Здобувач **розробив** термодинамічно обґрунтовані математичні моделі тепломасопереносу та механодифузії в багатокомпонентних капілярно-пористих тілах під час конвективного, активного гідродинамічного сушіння, розробив та обґрунтував аналітико-числові методи реалізації таких моделей з урахуванням фазових змін, структурної неоднорідності тіл, та режимних параметрів сушильного агента, що дозволило забезпечити точний опис розподілу температури, вологості та визначити напружено-деформований стан тіл капілярно-пористої структури в довільний момент процесу сушіння.

Висновки до дисертації підкреслюють наукову новизну та практичну значущість проведених досліджень і розроблених моделей. **Список використаних джерел** демонструє ґрунтовність проведеного аналізу сучасного стану математичного моделювання процесів сушіння дисперсних матеріалів капілярно-пористої структури.

За темою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, з них: 4 статті у періодичних виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою даних Scopus (квартиль Q3); 2 статті у фахових наукових виданнях України (категорія Б); а також 5 тез доповідей і матеріалів конференцій, серед яких 2 індексуються в НМБД (Scopus), в яких повною мірою висвітлені наукові положення та результати дисертаційної роботи здобувача.

Наукова обґрунтованість отриманих результатів, наукових положень, висновків, рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Анатолія Дмитрука, випливають зі створення обґрунтованих математичних моделей тепломасопереносу та механодифузії в багатокомпонентних капілярно-пористих тілах під час природного та стимульованого сушіння, розробки та обґрунтувань аналітико-числових методів реалізації таких моделей. Несуперечливість отриманих теоретичних результатів підтверджено числовими експериментами, результати яких узгоджуються з результатами, наведеними в літературі. Отримані в дисертації висновки узагальнюють наукові результати та їх практичну важливість. Також, достовірність отриманих здобувачем результатів засвідчена відповідними актами впровадження, обговоренням матеріалів дисертації на міжнародних науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах кафедри, де вони отримали позитивну оцінку.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукове завдання, поставлене перед здобувачем, полягало в розробці термодинамічно

обґрунтованих математичних моделей тепломасопереносу та механодифузії в багатокомпонентних капілярно-пористих тілах під час природного та стимульованого сушіння, розроблення та обґрунтування аналітико-числових методів реалізації таких моделей з урахуванням фазових змін, структурної неоднорідності тіл та режимних параметрів сушильного агента, що дозволяє забезпечити точний опис розподілу температури, вологості та визначити напружено-деформований стан тіла в довільний момент процесу сушіння. Вважаю, що це завдання повністю виконано і було досягнуто поставлену мету. Зокрема, у ході розв'язання поставленої наукової задачі здобувачем отримані такі основні наукові результати:

вперше

- побудовано математичну модель теплопровідності та механодифузії в шарі дисперсного матеріалу капілярно-пористої структури та в окремих його частинках під час активного гідродинамічного сушіння в імпульсному режимі. Побудована модель, на відміну від інших, враховує внутрішню неоднорідну структуру частинок (двошарова структура), що дозволяє визначити вологість, температуру, напружено-деформований стан тіла в будь якій точці багатофазної багатокомпонентної системи в залежності від швидкості та імпульсного режиму подачі сушильного агента;
- для шару дисперсного матеріалу складеного з частинок капілярно-пористої структури сформульована повна система співвідношень для опису процесів активного гідродинамічного осушення та на їх основі розв'язано нові задачі про вплив імпульсного характеру подачі сушильного агента та місцезнаходження частинки в шарі на процес сушіння;
- розроблено та обґрунтовано ефективний метод побудови аналітичних розв'язків з'єднаних контактено-крайових задач теплопровідності та механодифузії в шарі дисперсного матеріалу капілярно-пористої структури та в його окремих частинках за імпульсного характеру дії збурюючих функцій температури та вологовмісту сушильного агента із врахуванням неоднорідності частинки та її розташування в шарі.
- розроблено та обґрунтовано аналітично-числовий метод для визначення напружено-деформованого стану окремої дисперсної частинки в шарі дисперсного матеріалу капілярно-пористої структури за заданими концентрацією вологи та температурою у будь-якій точці частинки вздовж радіусу під час активного гідродинамічного сушіння. Метод враховує параметри режиму сушіння (швидкість продуву, циклічність дії, температуру та вологість), що дозволяє уточнити вплив цих режимних параметрів на структурну стабільність частинки протягом процесу сушіння.
- знайдено розв'язки контактено-крайових задач нестационарних процесів тепломасопереносу та механодифузії у шарі дисперсного

матеріалу, що складається з частинок капілярно-пористої структури, враховуючи двошаровість частинки, за імпульсної дії сушильного агента.

удосконалено модель механодифузії в шарі дисперсного матеріалу капілярно-пористої структури та в його окремих частинках під час усталеного природного або стимульованого осушення продуванням цього шару потоком сушильного агента з урахуванням багатокомпонентної структури частинок шляхом корекції початкових умов на концентрацію вологи в міждисперсному просторі, що дозволило підвищити рівень адекватності математичного опису процесів конвективного сушіння дисперсних матеріалів капілярно-пористої структури та забезпечило науково-обґрунтовану аналітико-числову реалізацію розв'язування відповідних контактено-крайових задач за крайових умов першого роду та змішаних крайових умов.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.

Структура дисертації, мова та стиль викладення відповідають вимогам, щодо оформлення дисертацій доктора філософії. Застосована в роботі наукова термінологія є загально визнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України, зокрема наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та містить усі необхідні структурні елементи.

За актуальністю тематики, обсягом проведених досліджень, науковою новизною отриманих результатів та їх практичним значенням дисертаційна робота **Анатолія Дмитрука** відповідає вимогам та паспорту спеціальності 113 Прикладна математика.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні.

Практичне значення одержаних результатів. За допомогою розроблених аналітико-числових методів отримано розв'язки контактено-крайових задач нестационарних процесів тепломасопереносу та механодифузії у шарі дисперсного матеріалу, складеного з частинок капілярно-пористої структури. Вони стали основою для створення комп'ютерних програм дослідження гідродинамічних процесів сушіння багатокомпонентних капілярно-пористих матеріалів за імпульсного режиму подачі сушильного агента. Розроблений пакет програм дозволяє визначати значення концентрації вологи, температури та компонентів напружень в окремих частинках залежно від їх структурної

неоднорідності, місцезнаходження у шарі та режимних параметрів сушильного агента в умовах гідродинамічного сушіння.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві «Трамбетон Україна» для оптимізації технологічного процесу виготовлення залізобетонних виробів. Моделювання та оптимізація профілів температури та вологості на різних етапах сушіння матеріалів дозволили покращити якість кінцевої продукції та знизити енерговитрати на сушіння.

Результати наукових досліджень також використано у Національному університеті «Львівська політехніка» для підготовки аспірантів у рамках навчальної дисципліни «Математичне моделювання нерівноважних систем» за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Зауваження до дисертації:

1. Доцільно було б виділити результати чисельного моделювання, пов'язані з визначенням напружено-деформованого стану зерна за усталеного режиму конвективного сушіння, в окрему підсекцію. Це дозволить чіткіше структурувати матеріал та підкреслити значущість отриманих результатів у контексті загальної тематики дослідження.
2. У секції 1.3, де розглядається капілярний потенціал, що відіграє ключову роль у примезових явищах і зумовлює рух рідини в капілярно-пористих середовищах, відсутні посилання на відповідні дослідження. Рекомендується додати посилання на роботи, що висвітлюють це питання.
3. На сторінці 45 джерела у списку літератури, що йдуть підряд, розділені комою, а не тире ([84,85]). Відповідно до правил оформлення, їх слід подати у вигляді [84–85].
4. На сторінці 121 у тексті "сушіння ≈ 1 год. [93]" необхідно усунути крапку після "год" відповідно до мовних норм.
5. На сторінці 57 підпис до рисунка 2.1 "Структура будови порового шару" містить тавтологію. Доцільно змінити його на "Структура порового шару" або "Схема будови порового шару" для уникнення повтору значень.

Вказані зауваження не знижують позитивної оцінки дисертації в цілому, а також розроблених автором основних наукових висновків та отриманих результатів проведених досліджень.

Висновок.

Дисертаційна робота **Анатолія Дмитрука** є завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язана актуальна наукова задача розробки термодинамічно обґрунтованих математичних моделей тепломасопереносу та механодифузії в багатокомпонентних капілярно-пористих тілах під час природного та стимульованого сушіння, розроблення та обґрунтування аналітико-числових методів реалізації таких моделей з урахуванням фазових змін, структурної неоднорідності тіл та режимних параметрів

сушильного агента, що дозволяє забезпечити точний опис розподілу температури, вологості та визначити напружено-деформований стан тіла в довільний момент процесу сушіння.

На підставі детального аналізу представленої дисертаційної роботи, зокрема її актуальності та новизни, глибини виконаного дослідження та його теоретичного значення, обґрунтованості основних положень і висновків, наявності наукової та практичної цінності, можна зробити висновок, що робота відповідає вимогам, які сформовані до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії та встановлені наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постановою КМ від 12 січня 2022 р. № 44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» з останніми змінами внесеними постановою КМ № 341 від 21.03.2022 р., а її автор Дмитрук Анатолій Андрійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика, галузь знань 11 Математика та статистика.

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук,
професор,
професор кафедри вищої математики
Інституту прикладної математики
та фундаментальних наук
Національного університету
«Львівська політехніка»



Роман МУСІЙ



