

РЕЦЕНЗІЯ

доцента, кандидата фізико-математичних наук, доцента кафедри прикладної математики Інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка» Сеника Андрія Петровича 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. Процес сушіння капілярно-пористих матеріалів, зокрема сільськогосподарської продукції, особливо зернових культур, є надзвичайно актуальною проблемою, що має важливе промислове значення. Осушення зерна є необхідною умовою його тривалого зберігання, але цей процес виходить за межі суто теплофізичних явищ. Він має складний технологічний характер, оскільки тісно пов'язаний із формами зв'язку вологи з матеріалом та закономірностями переносу тепла і вологи у вологих середовищах. Особливу роль відіграють взаємодії пористих тіл із нагрітими поверхнями, гарячими газами або електричними полями, що впливають на зміну технологічних, біологічних та структурно-механічних властивостей матеріалів під час випаровування вологи.

Серед значущих наукових досліджень у цій сфері варто відзначити роботи П.А. Ребіндера, С.М. Ліпатова та Г.А. Максимова, які заклали основи теорії форм зв'язку вологи з матеріалами. Ця тема є особливо актуальною для деформівних дисперсних середовищ, таких як щільні упаковки вологих капілярно-пористих тіл. У таких середовищах зміна кількості гігроскопічної вологи викликає зміну розмірів матеріалу (усушка чи розбухання), а також формування градієнта густини у порах по товщині шару та радіусах частинок.

Математичний опис процесів сушіння таких багатофазних капілярно-пористих матеріалів зазвичай виконується на основі принципу гомогенізації неоднорідних структур. Вагомий внесок у розвиток теорії гомогенізації зробили П.С. Косович, А.В. Лебедев, Я.М. Мініович, У.К. Льюїс, Т.К. Шервуд та ін.

Таким чином, розробка адекватних математичних моделей, аналітичних і числових методів для вивчення процесів тепломасопереносу та напружено-деформованого стану багатокомпонентних матеріалів із капілярно-пористою структурою залишається важливою науково-практичною задачею. Актуальність цієї теми зумовлена необхідністю вдосконалення апарату математичного моделювання процесів сушіння, що має важливе значення для галузі знань 11 Математика та статистика.

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 дисертації та її завершеність. Дисертація загальним обсягом 171 сторінка містить анотацію, список опублікованих праць, вступ, чотири розділи, висновки до розділів, загальні висновки, перелік використаних джерел літератури (179 найменувань, з них 72 іноземними мовами) та 2 додатки. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи складає 146 сторінок. Усі результати дослідження представлені у 10 таблицях та 28 рисунках, що наочно ілюструють отримані наукові положення та висновки.

Здобувач проаналізував 179 джерел літератури та встановив, що постановки задач сушіння базуються на моделях, які описують взаємозв'язані явища тепломасопереносу та деформування, що протікають у процесі осушення. Особливу увагу приділено використанню термодинамічних принципів, гомогенізації та стохастичних підходів до моделювання таких процесів. Акцентовано важливість застосування принципу гомогенізації до опису фазових переходів, що відбуваються між рідиною та парою, а також їхньому впливу на напружено-деформований стан капілярно-пористого матеріалу.

Проведено аналіз літератури з питань основних форм зв'язку вологи з тілом, від яких залежить швидкість переміщення вологи всередині матеріалу, адсорбційні та капілярні зв'язки. Кількість адсорбційно-зв'язаної та мікрокапілярної вологи визначається температурою та тиском навколишнього середовища, і така волога класифікується як гігроскопічна. Особливе значення надається гігроскопічній волозі, оскільки її вплив на структуру та розміри матеріалу (усушка або розбухання) визначає важливі механічні характеристики.

Розгляд впливу зв'язаності вологи на тепломасоперенос і структурно-механічні властивості пористих тіл та отримані висновки доповнюють розуміння як дисертант використав в подальшому концепції фізики, термодинаміки та структурної механіки для математичного моделювання процесів сушіння багатокомпонентних тіл капілярно-пористої структури за різних режимів сушіння.

Здобувач обґрунтував застосування підходів теорії сумішей та методів механіки багатошвидкісних систем для моделювання багатофазних та багатокомпонентних систем капілярно-пористих тіл. Отримані фізичні співвідношення забезпечують цілісний опис поведінки тіла на основі припущень щодо просторово-часових змін досліджуваних параметрів.

Здобувач розробив термодинамічно обґрунтовані математичні моделі тепломасопереносу та механодифузії в багатокомпонентних капілярно-пористих тілах під час конвективного та активного гідродинамічного

сушіння. У роботі обґрунтовано та запропоновано аналітико-числові методи реалізації цих моделей, що враховують фазові переходи, структурну неоднорідність матеріалів і режимні параметри сушильного агента. Це дозволило отримати точний опис розподілу температури й вологості, а також визначити напружено-деформований стан капілярно-пористих тіл у будь-який момент процесу сушіння.

Об'єктом дослідження здобувач визначив нелінійні процеси сушіння багатокомпонентних капілярно-пористих тіл.

Предметом дослідження обрано математичні моделі та методи нелінійної механіки, що застосовуються для опису процесів конвективного, природного та активного гідродинамічного осушення багатокомпонентних капілярно-пористих тіл і шарів, з урахуванням їх структурної неоднорідності та фазових переходів рідини в пару.

Висновки роботи обґрунтовано та сформульовано чітко, що підтверджує завершеність дослідження та його відповідність сучасним науковим вимогам.

Повнота висвітлення наукових положень та результатів в опублікованих працях. Апробація результатів. Наукові результати та основні положення, висновки й окреслені рекомендації до оптимізації процесів сушіння багатокомпонентних капілярно-пористих тіл повно викладено в 11 наукових працях, з них: 4 статті, опубліковані у періодичних виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою даних Scopus; 2 статті у фахових наукових виданнях України; 5 тез доповідей та матеріалів конференцій, з яких 2 індексуються міжнародною наукометричною базою даних Scopus.

Основні результати дисертаційного дослідження було представлено та обговорено на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах, що підтверджує їхню наукову новизну та актуальність. Зокрема, результати доповідалися на таких наукових заходах, як Міжнародні конференції "Системний аналіз та інформаційні технології" (SAIT-2016, SAIT-2017), "Комп'ютерні науки та інформаційні технології" (CSIT-2020), "Математичні проблеми механіки неоднорідних структур" (МПМН-2024), а також на Міжнародному семінарі/воркшопі IEEE "Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль" (DIPED-2023).

Наукова обґрунтованість отриманих результатів, наукових положень, висновків, рекомендацій. Наукова обґрунтованість отриманих Анатолієм Дмитруком результатів базується на використанні сучасних підходів до моделювання та аналізу процесів сушіння капілярно-пористих тіл із локальною неоднорідністю. Для побудови математичних моделей у роботі застосовано методи термодинаміки незворотних процесів, теорії сумішей та просторового осереднення, що забезпечує комплексний опис тепломасопереносу та напружено-деформованого стану багатокомпонент-

них середовищ. Отримані в дисертації висновки узагальнюють наукові результати та їх практичну важливість.

Результати роботи є науково обґрунтованими, оскільки пройшли апробацію на низці міжнародних конференцій і семінарів кафедри прикладної математики Національного університету "Львівська політехніка".

Наукова новизна отриманих результатів. Наукове завдання, поставлене у дисертаційній роботі, має високий рівень складності та актуальності. Дослідження спрямоване на розробку математичних моделей тепломасопереносу та механодифузії у багатокомпонентних капілярно-пористих тілах з урахуванням неоднорідностей структури, фазових переходів та режимних параметрів сушіння. Це завдання є важливим не лише з точки зору теоретичних досліджень, але й має суттєву практичну значущість для промисловості та сільського господарства.

Здобувач продемонстрував високий рівень опанування сучасною методологією наукової діяльності. Використання методів термодинаміки незворотних процесів, теорії сумішей, гомогенізації та стохастичних підходів свідчить про здатність автора до комплексного аналізу багатофазних систем. Застосування числових і аналітичних методів при розв'язанні задач механодифузії та тепломасопереносу підтверджує наукову зрілість здобувача та його вміння ефективно використовувати математичний апарат.

При розв'язанні поставленої наукової задачі здобувачем отримані такі основні наукові результати:

1. Вперше створено математичну модель тепломасопереносу та механодифузії для шару дисперсного матеріалу, що враховує фазові зміни та вплив неоднорідностей частинок під час стимульованого сушіння у гідродинамічному режимі з імпульсною подачею сушильного агента.
2. Вперше побудовано систему рівнянь для активного гідродинамічного сушіння, яка дозволяє дослідити вплив імпульсного характеру подачі сушильного агента та положення частинки в шарі.
3. Вперше розроблено ефективний аналітико-числовий метод і програмне забезпечення для вирішення задач теплопровідності та механодифузії, з урахуванням неоднорідності частинок і їх розташування в шарі.
4. Вперше запропоновано метод визначення напружено-деформованого стану частинки, що враховує концентрацію вологи, температуру та вплив режимних параметрів сушіння на структурну стабільність матеріалу.
5. Удосконалено модель механодифузії для усталеного конвективного сушіння продуванням шару дисперсного матеріалу, що підвищило

адекватність опису процесів і дозволило розробити методи розв'язання контактної-крайових задач.

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 загальноновизнаною, 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.

Аналіз звіту подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння дозволяє зробити висновок, що дисертаційна робота Дмитрука Анатолія Андрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату або неправомірних запозичень. Отримані результати демонструють індивідуальність наукового підходу автора. У тексті дисертації чітко простежується авторський стиль, а всі використані наукові джерела коректно оформлені із відповідними посиланнями. Перевірка не виявила некоректних текстових запозичень чи безпідставного використання наукових результатів інших дослідників.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені математичні моделі тепломасопереносу та механодифузії дозволяють оптимізувати процеси сушіння дисперсних матеріалів із капілярно-пористою структурою, зменшуючи енерговитрати та покращуючи якість кінцевої продукції. Запропоновані методи визначення напружено-деформованого стану забезпечують збереження форми та механічних властивостей матеріалів. Результати дослідження застосовні в харчовій, будівельній та аграрній галузях, а також при розробці енергоефективних сушильних установок.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві «Трамбетон Україна» для оптимізації технологічного процесу виготовлення залізобетонних виробів. В Національному університеті «Львівська політехніка» результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес для підготовки аспірантів у рамках

навчальної дисципліни «Математичне моделювання нерівноважних систем» за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Дискусійні положення, рекомендації та зауваження до змісту дисертації. Загалом позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих результатів, вважаємо за потрібне висловити певні зауваження та побажання:

1. Результати числових досліджень напружено-деформованого стану зернини під час усталеного конвективного осушення шару зерна представлені в табличній формі, що дозволяє кількісно оцінити величини переміщень, деформацій та напружень. Водночас доцільним було б доповнити цю інформацію графічним поданням, яке надасть більш наочне уявлення про характер розподілу зазначених фізичних величин.

2. На сторінці 83 у тексті зазначено: "Таким чином ми отримали повний розв'язок для $s(r,z,t)$ ". Доцільно було б в цьому місці подати цей розв'язок ще раз у повному вигляді для забезпечення більшої зручності сприйняття матеріалу.

3. У четвертому розділі «Пакет програм для дослідження процесів активного гідродинамічного сушіння дисперсного матеріалу в імпульсному режимі», підпункт 4.4 має назву "Запуск пакету", а його підпункти 4.4.1 і 4.4.2 описують дві підпрограми обчислень розподілів температури та концентрації вологи в структурних елементах зернівки та її напружено-деформованого стану. Доцільно було б змінити назву підпункту 4.4 на "Меню пакету програм", що краще б відображало зміст цього розділу та його підрозділів.

4. У другому розділі наведені числові результати впливу масоперенесення на напружено-деформований стан зернівки в процесі сушіння залежно від комплексу величин теплофізичних і механічних властивостей. Однак у розділі відсутні обґрунтування щодо вибору значення початкової і кінцевої вологості зерна, обраного для подальших обчислень у технологічному процесі сушіння.

Перераховані зауваження мають рекомендаційний характер і не ставлять під сумнів результати дисертації та не впливають на її позитивну оцінку.

Висновок. Дисертаційна робота **Анатолія Дмитрука** є самостійним, 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 новизни, теоретичного і практичного значення, можна зробити висновок, що робота заслуговує на позитивну оцінку, 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:

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної математики
Інституту прикладної математики
та фундаментальних наук
Національного університету
«Львівська політехніка»



Андрій СЕНИК

Підпис
Вчений



Р.Бродявський