

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
д.т.н., професору Буню Ростиславу Адамовичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата технічних наук, доцента

Борецької Ірини Богданівни

на дисертаційну роботу

Дмитрука Анатолія Андрійовича

«Математичне моделювання процесів сушіння багатокомпонентних капілярно-пористих тіл з урахуванням фазових змін»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 11 «*Математика та статистика*»
за спеціальністю 113 «*Прикладна математика*»

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Зерно – одна з найважливіших сільськогосподарських культур, що має ключове значення для світового народного господарства. Його виробництво, зберігання та переробка є стратегічно важливими для продовольчої безпеки та економічної стабільності. Водночас, прогнозується, що зміна клімату матиме каскадний вплив на світові ринки зерна, оскільки зміни температурного режиму, вологості та інших факторів можуть призводити до значних втрат урожаю.

Одним із найкритичніших етапів післязбиральної обробки зерна є його сушіння, яке забезпечує збереження якості та запобігає розвитку мікробіологічних процесів. Процес сушіння повинен проводитися з урахуванням фізичних і фізіологічних властивостей зерна, які визначають оптимальні режими теплової обробки. Основним способом сушіння є теплове сушіння, проте його ефективність залежить від численних параметрів: гранично допустимих температур, які залежать від роду зерна, його цільового призначення, вихідної вологості та конструкції сушарень.

Зернові маси мають низьку теплопровідність, що є природним засобом збереження теплового режиму при зберіганні. Водночас, для підтримання оптимального стану зерна необхідно враховувати нижню температурну межу, адже при нульовій температурі дихальні процеси в зерні зупиняються. Вологе зерно активно дихає, що прискорює його псування, а поява вільної вологи значно підвищує фізіологічну активність зерна, створюючи ризики розвитку мікроорганізмів.

Окрім того, структурні особливості зернової маси, зокрема неоднорідність форми та розмірів зерен, формують міжзерновий простір, через який передача тепла відбувається молярним або молекулярним способом через повітря. Для забезпечення ефективного зберігання злакових культур необхідний регульований повітрообмін у зерновій масі, що може здійснюватися шляхом повільної або періодичної вентиляції. Важливим фактором є конвективний тепло- та масоперенос. Залежно від швидкості продування можливі різні режими осушення: при малих швидкостях – осушення в нерухомому шарі, при вищих швидкостях – газозважений або рухомий шар.

Саме термодинамічно обґрунтованому математичному моделюванню таких складних, багатопараметричних процесів сушіння дисперсних матеріалів з фазовими переходами, розв'язанню відповідних задач математичної фізики із застосуванням аналітично-числових методів та на їх основі отримання детального опису розподілів вологи, температури та напружено-деформованого стану частинок присвячена дисертаційна робота здобувача. Дослідження є надзвичайно актуальним, оскільки розробка ефективних математичних моделей дозволяє оптимізувати процеси сушіння, підвищити їх енергоефективність і забезпечити збереження зернових культур у найкращих умовах.

Актуальність теми дисертаційної роботи підтверджується її виконанням у межах держбюджетних науково-дослідних проєктів кафедри прикладної математики Інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка», спрямованих на розробку математичних моделей та чисельних методів для опису природничих і соціально-економічних процесів.

НАУКОВА НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

- *Вперше* побудовано математичну модель тепломасопереносу 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.

- *Вперше* 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.

- *Вперше* розроблено та обґрунтовано ефективний метод побудови аналітичних розв'язків з'єднаних контактено-крайових задач тепломасопровідності 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.

- *Вперше* 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.

- *Вперше* 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 масопереносу та 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 контактнo-крайових задач за крайових умов першого роду та змішаних крайових умов.

КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНОГО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота Дмитрука А.А. складається зі вступу, основної частини, що містить чотири розділи, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків.

У вступі сформульовано мету, об'єкт, предмет та завдання дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено дослідження основних підходів, які застосовуються при математичному моделюванні сушіння дисперсних матеріалів капілярно-пористої структури. Зокрема, розглянуто структуру капілярно-пористих матеріалів, їхні фізико-механічні характеристики та механізми тепло- і вологопереносу. Описано класичні, а також сучасні підходи до математичного моделювання сушіння таких матеріалів, включно з конвективними та дифузійними моделями. Окремо висвітлено методи розрахунку напружено-деформованого стану матеріалу під час сушіння, застосування чисельних методів (скінченних різниць, скінченних елементів) для розв'язання відповідних рівнянь. Завершальною частиною є аналіз особливостей

тепломасопереносу та фазових змін у зерні, що враховує його фізіологічні властивості та вплив міжзернового простору на ефективність сушіння.

У другому розділі представлено удосконалену модель сушіння нерухомого шару дисперсного матеріалу за умов його усталеного продуву відносно сухим повітрям, відтворюючи «м'який режим» сушіння, коли вважається, що процес осушення залежить тільки від різниці концентрацій вологи в поровому просторі та на його поверхні. Введено корекцію початкових умов на концентрацію вологи в поровому просторі, що дозволило точніше врахувати вплив крайових умов першого та третього роду на динаміку вологопереносу. Запропоновано аналітико-числову реалізацію розв'язання поставлених контактено-крайових задач вологопереносу та механодифузії, та отримано розв'язки, за якими проведено числове моделювання розподілів концентрації вологи та напружено-деформованого стану частинки дисперсного матеріалу залежно від її розміщення в шарі та швидкості продуву шару. Запропоноване уточнення вихідних параметрів продемонструвало кращу узгодженість розрахункових даних з експериментальними результатами та дозволило точніше контролювати стан зернистого матеріалу протягом усього процесу сушіння, запобігаючи його розтріскуванню.

У третьому розділі розроблено математичну модель активного гідродинамічного сушіння дисперсного матеріалу в імпульсному режимі подачі сушильного агента, яка враховує внутрішню неоднорідність частинок, моделюючи їх як двошаровий структура. Визначення теплофізичних властивостей системи проводиться окремо для зернини і для зваженого шару. Досліджується вплив керуючих функцій (пароповітряної суміші, температури, та режиму їх подачі). На відміну від попередніх моделей, запропонований підхід дозволяє детально аналізувати та точно визначати параметри вологовмісту, температури та напружено-деформованого стану в будь-якій точці частинки. Це забезпечує більш точний опис перерозподілу вологи між шарами частинки в процесі сушіння та дозволяє оптимізувати режими сушіння відповідно до фізико-хімічних характеристик матеріалу, покращуючи його якість та енергоефективність процесу.

У четвертому розділі представлено пакет програм для дослідження процесів активного гідродинамічного сушіння дисперсного матеріалу в імпульсному режимі.

Розроблене програмне забезпечення ґрунтується на розробленій математичній моделі активного гідродинамічного сушіння дисперсних матеріалів, і дозволяє проводити кількісний та якісний аналіз змін концентрації вологи та температури в шарі дисперсного матеріалу з урахуванням фізико-хімічних характеристик частинок, їхньої структурної неоднорідності та режимних параметрів сушильного агента.

Пакет програм реалізує аналітико-числові методи розв'язання контактнo-крайових задач тепломасопереносу та механодифузії окремо в зернині та в газозваженому шарі зерна, що дає змогу відстежувати динаміку процесу сушіння в реальному часі, оцінювати напружено-деформований стан частинок та оптимізувати технологічні параметри сушіння.

Висновки дисертаційної роботи відображають наукову новизну, практичну цінність та результати проведених досліджень.

СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ, ЇХ ДОСТОВІРНІСТЬ

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Дмитрука Анатолія Андрійовича, є обґрунтованими та коректно підтвердженими використанням сучасного математичного апарату. Вони підкріплені успішною аналітико-числовою реалізацією, що забезпечило узгодженість теоретичних розрахунків із експериментальними результатами та продемонструвало ефективність запропонованих моделей у практичному застосуванні.

Обґрунтованість висновків базується на детальному аналізі наукових джерел, чітко сформульованій постановці задач дослідження, застосуванні сучасних методів математичного моделювання та правильному використанні аналітичних і чисельних підходів при розгляді процесів тепломасопереносу та механодифузії.

Достовірність та ефективність запропонованих методів підтверджується відповідністю розрахункових даних експериментальним результатам, а також можливістю оптимізації технологічних параметрів сушіння завдяки розробленому програмному забезпеченню.

Наукові положення та рекомендації логічно випливають із отриманих результатів і мають чітке теоретичне та практичне підґрунтя. Це дозволяє стверджувати, що висновки та запропоновані рішення є коректними, добре обґрунтованими та можуть бути рекомендовані для використання в науковій і промисловій практиці.

Отже, поставлене у дисертації наукове завдання виконано повністю, а здобувач демонструє високий рівень володіння методологією наукових досліджень у галузі математичного моделювання тепломасообмінних процесів.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

При математичному моделюванні сушіння зерна в газозваженому стані особливе значення має аналіз напружено-деформованого стану окремої зернини за різних параметрів імпульсної дії сушильного агента. Це критично важливо, оскільки основним завданням сушіння є досягнення рівномірного осушення зерна, що запобігає розтріскуванню - фактору, який безпосередньо впливає на подальше тривале зберігання та якість кінцевого продукту.

Практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у розробці пакету програм, який дозволяє визначати напружено-деформований стан у довільній точці зернини, враховуючи її двошарову структуру, а також розподіли вологи та температури. Розроблене програмне забезпечення дає можливість моделювати вплив імпульсного сушіння на вологовміст, температурне поле та внутрішні напруження зерна; оптимізувати режими сушіння, забезпечуючи зменшення енергетичних витрат та підвищення рівномірності висихання матеріалу; запобігати розтріскуванню, що є ключовим для збереження якості зерна та продовження його терміну зберігання.

Отримані результати можуть мати широке практичне застосування у промислових сушильних технологіях, сприяючи їх вдосконаленню та підвищенню ефективності. Крім того, розроблені моделі та програмне забезпечення вже впроваджені у виробничий процес та використовуються в освіті, що підтверджено відповідними актами впровадження, представленими у Додатку А.

ОФОРМЛЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ, ДОТРИМАННЯ ВИМОГ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ ТА ПОВНОТА ВИКЛАДУ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

Дисертаційна робота написана українською мовою та викладена логічно, послідовно і на високому науково-технічному рівні з використанням сучасної термінології. Матеріали подано структуровано та доступно, що забезпечує їх чітке сприйняття та розуміння. Стиль викладу відповідає вимогам науково-технічних текстів, а використана термінологія є загальноприйнятою у відповідній науковій галузі.

Текст дисертації ілюстрований таблицями та рисунками, що сприяє наочному представленню отриманих результатів. Робота має логічну структуру і викладена на 171 сторінці (з них 146 сторінок основного тексту). Вона містить анотацію, зміст, вступ, чотири основні розділи, 28 рисунків, 10 таблиць, а також список використаних джерел із 179 найменувань та два додатки.

Дисертація оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації». За своїм змістом вона відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 113 Прикладна математика, галузь знань 11 Математика та статистика.

Розгляд звіту подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння підтверджує, що робота Дмитрука Анатолія Андрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача та не містить фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату чи запозичень без належного посилання на

джерела. Всі результати дисертації є оригінальними, а в тексті простежується авторський стиль.

Основні положення дисертації опубліковано у 11 наукових працях, серед яких: 2 статті у наукових фахових виданнях України, 4 статті у міжнародних наукових виданнях, що індексуються у Scopus, 2 публікації у матеріалах конференцій, індексованих у Scopus/Web of Science, 3 публікації у матеріалах наукових та науково-практичних конференцій.

Таким чином, наукові результати, представлені в дисертації, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

ЗАУВАЖЕННЯ ДО ДИСЕРТАЦІЇ

Незважаючи на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи, варто відзначити деякі зауваження до дисертаційної роботи:

1. У дисертації зерно розглядається як двокомпонентний твердий розчин, де масова концентрація вологи є змінною величиною, що перебуває в рівновазі між рідкою та паровою фазою. Проте для матеріалів із високою початковою вологістю важливим питанням є момент, з якого можна вважати, що рідка фаза повністю випарувалася, і тепломасоперенос відбувається лише за участю парової та повітряної фаз. Водночас у роботі не зазначено явного критерію припинення сушіння, що є важливим для практичного застосування отриманих результатів.

2. У рівнянні для потоку вологи J_R через поверхню кульки відсутнє фізичне обґрунтування вибору знаків.

3. Розмір частинок дисперсного середовища впливає на пористість шару, що може змінювати ефективний коефіцієнт масообміну між частинками та поровим середовищем. Відсутнє обґрунтування вибору фіксованого розміру частинок та його впливу на процес масоперенесення.

4. Розроблена математична модель дозволяє виявити закономірності впливу процесу масоперенесення на динаміку деформацій і напружень у дисперсному матеріалі в процесі сушіння. Водночас доцільно було б дослідити зворотний вплив напружено-деформованого стану частинки на процес зміни вологості, зокрема врахувати можливість зміни локальної проникності матеріалу внаслідок

