

## ВІДГУК

офіційного опонента

**Остроги Руслана Олексійовича**

на дисертаційну роботу Чижовича Романа Андрійовича  
«Закономірності фільтраційного сушіння вторинної сировини  
органічного походження»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 161 *Хімічні технології та інженерія*  
(галузь знань 16 *Хімічна інженерія та біоінженерія*)

**Актуальність теми.** Відходи харчової промисловості України значною мірою представлені органічною рослинною сировиною, серед якої особливо виділяються залишки пивоварних і спиртових виробництв. Через відсутність сучасних технологій переробки ці відходи накопичуються, спричиняючи значне екологічне забруднення водних ресурсів, ґрунтів і атмосфери, а також втрачаючи потенційну цінність як вторинний ресурс. Основною перешкодою ефективної утилізації цих відходів є їхній високий рівень вологовмісту, який значно ускладнює зберігання, транспортування та технологічну обробку.

Осушення є ключовим етапом підготовки рослинної сировини до повторного використання. Цей процес дозволяє знизити вологовміст відходів, що, у свою чергу, сприяє полегшенню транспортування, покращенню умов зберігання та підвищенню фізико-хімічних характеристик матеріалу. Завдяки цьому відходи стають придатними для подальшої переробки, зокрема для виробництва органо-мінеральних добрив, кормових добавок або альтернативних видів палива. Осушення також сприяє збереженню цінних органічних компонентів, запобігаючи їх втраті та дозволяючи використовувати відходи як цінний вторинний ресурс.

Зростаючий попит на екологічно безпечні, енергоефективні та економічно доцільні технології переробки підкреслює надзвичайну актуальність наукового вивчення процесів сушіння. Дослідження, представлені у дисертаційній роботі Чижовича Р.А., мають стратегічне значення не лише для зменшення

екологічного навантаження від харчової промисловості, але й для створення нових економічних можливостей у цій галузі. Розроблені підходи спрямовані на підвищення ефективності використання відходів як вторинного ресурсу, зменшення витрат підприємств та забезпечення їх конкурентоспроможності на міжнародному ринку. Крім того, впровадження сучасних технологій сушіння сприятиме сталому розвитку харчової промисловості, гармонізуючи екологічні та економічні інтереси суспільства.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.** Наукові положення, висновки та технологічні рішення, представлені в дисертаційній роботі, ґрунтуються на глибокому теоретичному аналізі, комплексних експериментальних дослідженнях і числових методах моделювання, викладених у розділах 3–5. Їх достовірність забезпечується використанням сучасних стандартів досліджень, апробованих науково обґрунтованих методик і передових технологічних інструментів. Усі зроблені висновки підкріплені значним обсягом аналітичних і експериментальних даних, що були зібрані з дотриманням міжнародних методологічних стандартів і відповідають актуальним науковим підходам.

Тема дисертаційної роботи Чижовича Р.А. є важливою для наукової діяльності кафедри хімічної інженерії Національного університету «Львівська політехніка» та спрямована на вирішення актуальних проблем утилізації відходів харчової промисловості. Дослідження виконано в рамках держбюджетної теми БФ-2-2023 (реєстраційний номер № 0123U104178) за напрямком «Створення взірців вискоефективного альтернативного твердого палива з відходів харчової промисловості рослинного походження». Автор дисертації є одним із виконавців цього проєкту, що підкреслює його безпосередню участь у реалізації поставлених завдань у межах дослідження.

**Достовірність результатів досліджень.** Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджена відповідними експериментальними даними (розділи 3–5), апробацією на восьми конференціях різного рівня, а

також впровадженням у навчальний процес і виробництво на ТОВ «Вузлівський спиртовий завод» (акти впровадження додаються).

Наукові положення, практичне значення та висновки дисертації побудовані логічно, у контексті мети та сформульованих завдань. Вони підтверджені експериментальними дослідженнями, математично обґрунтовані та підкріплені теоретичним аналізом, що свідчить про високий рівень опрацювання теми.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, списку опублікованих праць за темою дисертації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки та містить 24 таблиці, 49 рисунків, список використаної літератури з 122 найменувань і додатки. Рисунки, таблиці, додатки і список використаних джерел літератури сумарно займають 21 сторінку.

**До основних нових наукових результатів дисертації можна віднести наступне:**

- проведено дослідження гідродинаміки руху потоку теплоносія крізь шар матеріалу та виконано комп'ютерне моделювання процесу з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent;
- встановлено кінетичні закономірності процесу осушення вторинної рослинної сировини органічного походження фільтраційним методом та показано вплив основних параметрів процесу;
- визначено технологічно раціональні параметри процесу фільтраційного сушіння вторинної рослинної сировини органічного походження на експериментальній установці, які можуть бути застосовані у промислових умовах.

**Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.** Узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних у даній роботі, дозволило розробити розрахункові залежності, які характеризують зміну вологовмісту вторинної рослинної сировини органічного походження у часі, визначають тривалість фільтраційного сушіння та

гідравлічний опір стаціонарного шару матеріалу. Застосування цих залежностей дає змогу прогнозувати параметри процесу, оцінювати енергетичні витрати, економічну доцільність і ефективність сушіння. Вони також допомагають обрати оптимальні технологічні режими, що забезпечують високу швидкість та інтенсивність процесу в умовах промислового виробництва.

Практична цінність отриманих результатів доведена їх впровадженням у виробничу діяльність ТОВ «Вузлівський спиртовий завод», що підтверджує ефективність фільтраційного сушіння для обробки вторинної сировини. Крім того, результати досліджень інтегровані у навчальний процес кафедри хімічної інженерії Національного університету «Львівська політехніка», сприяючи підготовці фахівців із сучасними компетенціями в галузі хімічної інженерії.

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Результати досліджень опубліковані у 17 наукових працях, серед яких 6 індексуються у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, одна – у фахових виданнях України, 2 розділи монографій і 8 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Інформацію про участь здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, наведено у тексті дисертаційної роботи.

Опубліковані праці цілком відображають основний зміст дисертаційної роботи та відповідають вимогам пункту 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44.

Публікації здобувача висвітлюють основні наукові положення дисертації, зокрема ті, що винесені на захист, і характеризують особистий внесок дисертанта.

**Оцінка змісту дисертаційної роботи.** Зміст роботи відповідає поставленим задачам. Виклад матеріалу системний та послідовний.

**У вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано її актуальність, чітко сформульовано мету та завдання досліджень, а також визначено наукову

новизну і практичну цінність отриманих результатів. Докладно розглянуто особистий внесок здобувача в роботу, представлено результати апробації дослідження, а також зазначені структура та обсяг дисертації.

*У першому розділі* дисертаційної роботи, присвяченому теоретичним основам сушіння дисперсних матеріалів органічного походження, проведено ґрунтовний аналіз сучасних наукових джерел, які розкривають ключові аспекти, закономірності та механізми процесу сушіння вологих рослинних матеріалів. Особливу увагу приділено аналізу фізико-хімічних характеристик дисперсних матеріалів, які впливають на ефективність сушіння, таких як вологовміст, структура, теплофізичні властивості та динаміка передачі вологи. Розглянуто основні способи передачі тепла та механізми переміщення вологи в залежності від властивостей матеріалу і режиму сушіння. Детально проаналізовано вплив цих чинників на енергоефективність процесу. Особливу увагу приділено перевагам та специфіці фільтраційного методу сушіння, зокрема його здатності забезпечувати рівномірне осушення матеріалів з високим вологовмістом за рахунок рівномірного розподілу теплоносія. Показано, що фільтраційний метод є високоефективним з точки зору енергетичних витрат та економічно доцільним для підготовки вологих матеріалів до подальшої переробки або зберігання. Також наведено порівняльний аналіз цього методу з іншими типами сушіння, що демонструє його конкурентні переваги.

*У другому розділі* дисертації, присвяченому характеристиці об'єктів дослідження та методикам проведення експериментів, детально обґрунтовано вибір вторинної рослинної сировини, отриманої з локальних промислових підприємств, як основи для проведення досліджень. Проведено аналіз доступності та економічної доцільності використання цих матеріалів, зокрема їх значення для зменшення обсягів відходів та реалізації принципів циркулярної економіки. Особливу увагу приділено аналізу ключових фізико-хімічних характеристик вихідних матеріалів, таких як вологовміст, структура частинок, пористість, теплофізичні властивості (теплопровідність, теплоємність), що суттєво впливають на кінетику та ефективність

фільтраційного сушіння. Наведено порівняльну характеристику декількох типів вторинної сировини, що дозволило обрати оптимальні об'єкти для подальших досліджень. Опис конструкції експериментальної установки включає деталі про її основні вузли, такі як система подачі теплоносія, фільтруючий шар, сенсори для контролю температури та вологості, а також програмне забезпечення для збору та аналізу даних. Зазначено, що установка дозволяє моделювати умови фільтраційного сушіння, характерні для промислових процесів, із високою точністю. Методики аналізу включають оцінку динаміки зменшення вологовмісту, визначення енергетичних витрат та аналіз зміни фізико-хімічних властивостей матеріалу в процесі сушіння. Для підвищення достовірності результатів експериментів проведено повторні вимірювання із використанням контрольних зразків, що дозволило оцінити похибки та узгодженість даних. Розроблені методики не лише забезпечили надійність отриманих результатів, але й можуть бути адаптовані для дослідження інших типів рослинної сировини в подібних умовах.

*У третьому розділі* дисертаційної роботи вивчено гідродинамічні характеристики руху теплового агенту через стаціонарний шар вторинної рослинної сировини органічного походження. Особливу увагу приділено визначенню впливу таких параметрів, як швидкість і температура теплоносія, густина та пористість матеріалу, на процес перенесення тепла й маси. Результати експериментальних досліджень узагальнені у вигляді рівнянь, які дозволяють оцінити гідравлічний опір шару матеріалу при різних висотах та швидкостях потоку теплового агенту. Ці рівняння є базовими для оптимізації параметрів промислового сушіння та прогнозування ефективності процесу. Комп'ютерне моделювання, виконане за допомогою програмного забезпечення ANSYS Fluent, дало змогу підтвердити отримані експериментальні дані та розширити уявлення про динаміку гідравлічного опору. Зокрема, моделювання дозволило візуалізувати розподіл швидкостей і температури теплоносія в шарі матеріалу, що неможливо зробити експериментально. Показано вплив неоднорідностей у структурі шару на локальні коливання гідравлічного опору та теплообмін, що відкриває нові можливості для оптимізації конструкції

сушарок. Результати моделювання та експериментів свідчать, що гідродинамічні характеристики є ключовими для забезпечення стабільного та енергоефективного процесу фільтраційного сушіння. Отримані рівняння можуть бути використані як основа для розробки інженерних методик проектування сушильного обладнання, що враховують специфіку вторинної рослинної сировини органічного походження.

*У четвертому розділі* роботи детально аналізуються кінетичні закономірності процесу осушення вторинної рослинної сировини органічного походження за допомогою фільтраційного методу при різних умовах. Розглянуто вплив таких ключових параметрів, як температура та швидкість теплоносія, початковий вологовміст матеріалу, товщина шару та його пористість, на динаміку сушіння. Особливу увагу приділено аналізу механізмів перенесення вологи на різних стадіях процесу – від інтенсивного випаровування на поверхні частинок до уповільненого видалення залишкової вологи з їхньої структури. Розроблено розрахункові залежності, які дозволяють прогнозувати зміну вологовмісту матеріалу в реальному часі з урахуванням перехідних процесів.

*У п'ятому розділі* дисертаційної роботи детально аналізуються технологічно оптимальні параметри процесу фільтраційного сушіння, які були визначені за допомогою експериментальної установки. До основних досліджуваних параметрів віднесено температуру і швидкість теплоносія, висоту шару матеріалу, а також початковий і кінцевий вологовміст вторинної рослинної сировини. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо вибору оптимальних режимів сушіння, які забезпечують максимальну продуктивність при мінімальних енергетичних витратах. Особливу увагу приділено порівнянню отриманих результатів із показниками традиційної сушарки барабанного типу. Встановлено, що фільтраційний метод сушіння демонструє значно вищу енергоефективність завдяки рівномірному розподілу теплоносія через шар матеріалу та зменшенню теплових втрат. Наведено дані щодо скорочення тривалості сушіння, зменшення енергоспоживання та підвищення якості кінцевого продукту у порівнянні з

традиційними методами. Додатково проаналізовано економічну доцільність використання фільтраційного методу в промислових умовах. Показано, що зменшення витрат на енергоносії, а також підвищення рівня автоматизації процесу створюють значний економічний ефект. Отримані результати підтверджують перспективність впровадження фільтраційного сушіння для обробки вторинної рослинної сировини органічного походження в умовах сучасного промислового виробництва.

**Висновки** дисертаційної роботи повно і логічно відображають етапи вирішення поставлених завдань, узагальнюють основні результати дослідження та підкреслюють їхню наукову й практичну значущість.

**Академічна доброчесність.** Результати дослідження, винесені на захист, отримані автором самостійно та повністю відображені в опублікованих працях. У роботах, виконаних у співавторстві, використані лише ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом індивідуальних наукових пошуків автора.

Порушень вимог академічної доброчесності у дисертації та наукових публікаціях, що відображають основні наукові результати дисертації Чижовича Р.А., не виявлено.

**Рекомендації стосовно використання результатів дисертації.** Поставлені завдання у контексті сформульованої мети досягнуто та доведено до логічного завершення. Проведені дослідження дозволили вирішити ключові питання, пов'язані з оптимізацією процесу підготовки вторинної рослинної сировини органічного походження для подальшого використання. Узагальнюючи результати, слід відзначити, що дана праця має яскраво виражений прикладний характер і спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної задачі – підготовки вторинної рослинної сировини органічного походження. Розроблені технологічні підходи та отримані теоретичні результати сприяють підвищенню ефективності процесів фільтраційного сушіння, зменшенню енергетичних витрат і забезпеченню екологічної безпеки.

**Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації.** Загалом дисертаційна робота Чижовича Р.А. демонструє достатній науковий рівень,



проте містить окремі зауваження, дискусійні аспекти та рекомендації для вдосконалення, серед яких слід виділити такі:

1. У дисертаційній роботі недостатньо обґрунтовано вибір програмного комплексу для моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар досліджуваних матеріалів. Зокрема, не подано порівняльного аналізу можливостей різних програмних середовищ, які могли б бути використані для вирішення поставленої задачі, та не висвітлено аргументи, які підтверджують доцільність застосування саме цього програмного комплексу. Це залишає дискусійним питання щодо переваг і обмежень використаного підходу у контексті досліджуваних процесів.
2. У третьому розділі дисертаційної роботи доцільно було б доповнити дослідження комп'ютерним моделюванням процесів теплообміну під час руху теплового агенту крізь шар досліджуваних матеріалів. Такі дослідження дозволили б отримати більш повне уявлення про розподіл температури у шарі матеріалу, виявити зони можливих нерівномірностей теплообміну та оптимізувати параметри процесу.
3. Розраховані результати досліджень у дисертації подаються з різною кількістю знаків після коми, що спостерігається, зокрема, у таблицях 4.1 та 5.6. Для забезпечення однорідності подання даних та підвищення наукової точності роботи доцільно було б уніфікувати кількість десяткових знаків у результатах. Це сприяло б кращому сприйняттю інформації, а також полегшило б порівняння значень у межах одного і того ж дослідження.
4. Доцільно було б додати аналіз ефективності використання інших поширених типів промислових установок для осушення досліджуваних матеріалів. Зокрема, порівняння фільтраційного методу з іншими методами сушіння (наприклад, барабанными, конвективними або контактними сушарками) дозволило б оцінити конкурентні переваги та недоліки розглянутої технології. Такий аналіз сприяв би кращому розумінню її застосовності у різних виробничих умовах, а також

підвищив би практичну значущість і загальну переконливість отриманих результатів.

5. Для досягнення поставленої мети у дисертації сформульовано 9 завдань, тоді як висновки подано у 11 позиціях. Така невідповідність може створювати враження, що не всі висновки безпосередньо впливають із вирішених завдань, або, навпаки, що деякі аспекти роботи не були відображені серед початкових завдань. Доцільно було б забезпечити узгодженість між кількістю завдань та висновків.
6. По тексті дисертації не всі одиниці вимірювання подано в системі СІ. У випадках, коли використовуються одиниці, що не належать до даної системи, доцільно було б навести обґрунтування такого вибору. Наприклад, це може бути пов'язано з необхідністю більш зручного або прийняттого для цільової аудиторії представлення інформації. Відсутність такого обґрунтування може викликати питання щодо послідовності у поданні даних та відповідності загальноприйнятим науковим стандартам. Рекомендується забезпечити узгодженість у використанні одиниць вимірювання або надати пояснення, чому обрано альтернативні одиниці вимірювання.

Зазначені недоліки та невідповідності жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація вирізняється актуальністю, високою науковою цінністю та значним практичним потенціалом, що підкреслює її важливість для сучасної науки та виробництва.

## **ВИСНОВОК**

Всебічний аналіз дисертаційної роботи Чижовича Р.А. «Закономірності фільтраційного сушіння вторинної сировини органічного походження» свідчить, що вона є завершеною, цілісною і самостійною кваліфікаційною працею. Логіка побудови та внутрішня структура роботи чітко підпорядковані поставленій меті й завданням, а отримані результати спрямовані на вирішення важливого науково-прикладного завдання, що має значний вплив на розвиток галузі.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що запропоновані автором висновки та рекомендації сприяють розвитку інноваційних напрямів і пріоритетів країни, зокрема в ефективному використанні вторинної рослинної сировини та зміцненні енергетичної незалежності.

За сукупністю якісних і формальних ознак щодо актуальності обраної теми, обґрунтованості наукових положень, практичного значення висновків і рекомендацій, їх достовірності й новизни дана дисертаційна робота відповідає вимогам, передбаченим Наказом Міністерства науки та освіти від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (зі змінами, внесеними Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019) та Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами згідно Постанови Кабінету Міністрів України від 03.05.2024 № 507), а її автор, Чижович Роман Андрійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія (галузь знань 16 – Хімічна інженерія та біоінженерія).

Офіційний опонент,  
кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімічної інженерії  
Сумського державного університету  
04.12.2024 р.



Руслан ОСТРОГА

