

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Іващука Олександра Сергійовича  
**«Наукові основи тепломасообмінних процесів під час виробництва  
альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного  
походження»**, подану на здобуття  
наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Дисертаційна робота Іващука Олександра Сергійовича містить авторські дослідження закономірностей тепломасообміну, що пов'язані із процесом фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження, яка за своїм походженням є відходами промислового виробництва та широко розповсюдженою на території України і, є перспективною для виробництва альтернативного твердого палива, зважаючи на свою структуру.

### **Ступінь актуальності обраної теми дисертаційної роботи.**

Зважаючи на принципи раціонального природокористування, сталого розвитку, проблематики управління відходами та біоциркулярної економіки – тема дисертаційної роботи є актуальною, що не викликає сумнівів. Стрімке зростання енергоспоживання та не менш стрімке погіршення екологічної ситуації у світі вимагають пошуку та освоєння нових альтернативних джерел палива. Наявність великої кількості сировинної бази, що має потенціал для використання в якості альтернативного твердого палива, потребує детальних відомостей та розширення існуючої бази знань, що безпосередньо мають відношення до цієї науково-прикладної проблеми.

Так як вторинна сировина рослинного походження має надлишкову вологість, попередня стадія сушіння технологічно важлива для продовження строку придатності сировини та можливості її використання для виготовлення твердого палива. Виявлення та вивчення закономірностей тепломасообміну сушіння вторинної сировини рослинного походження дозволить здійснити прогнозування ефективності промислового використання та проектування сушильного обладнання. Перспективним методом для сушіння дисперсної вологої сировини є запропонований метод фільтраційного сушіння, що дозволяє використовувати вторинну теплоту виробництва та інтенсифікувати промисловий процес сушіння. У зв'язку з цим можна стверджувати, що тема дисертаційної роботи представляється актуальною, має важливе наукове і практичне значення, оскільки спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає в створенні наукових основ тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Про актуальність тематики дисертаційних досліджень також свідчить її відповідність до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», ст.3, п.2,4,5, Закон України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», ст.4, п.2,5,7) і той факт, що робота виконувалася у Національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до плану науково-дослідних робіт (НДР) кафедри хімічної інженерії, в межах держбюджетних НДР за темою «Створення взірців високоефективного альтернативного твердого палива з відходів харчової промисловості рослинного походження» (ДР №0123U104178), а також за підтримки проєкту Horizon Europe INITIATE («Підтримка європейських досліджень і розробок через співпрацю із зацікавленими сторонами та інституційну реформу»).

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, в якій чітко і логічно викладено наукові основи тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. Наукові положення, теоретичні висновки та практичні рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, викладені в логічній послідовності, є достатніми і належним чином обґрунтованими. Великий обсяг матеріалів, зібраних в ході проведення наукових досліджень та експериментів, ретельно узагальнено і логічно проаналізовано. Наукові положення та теоретичні висновки у своєму логічному викладенні не суперечать фундаментальним положенням гідромеханіки та основним законам з теорії процесів тепло- та масопередачі. Достовірність результатів досліджень забезпечується коректною постановкою і вирішенням задач досліджень, методами досліджень та аналізу, які застосовувались автором, з використанням сучасних методик проведення досліджень, обладнання, програмного забезпечення та за допомогою методів фізичної, математичної, комп'ютерної обробки результатів експериментальних досліджень. Висновки за окремими розділами та загальні висновки до дисертаційної роботи викладено чітко та науково обґрунтовано.

### **Наукове значення одержаних результатів та їх новизна.**

Дисертаційна робота містить наукові положення та науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології, що розв'язують важливу науково-прикладну проблему, яка полягає у створенні наукових основ тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. У дисертаційній роботі вперше отримано та описано низку результатів, що становлять наукову новизну дослідження. Експериментально досліджено гідродинаміку, кінетику та

динаміку фільтраційного сушіння семи різних видів вторинної рослинної сировини, вивчивши вплив форми та структури частинок, висоти шару матеріалу та параметрів теплового агенту на швидкість сушіння. На основі експериментальних даних отримано критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів зовнішнього тепло- та масообміну у стаціонарному шарі досліджуваних матеріалів. Встановлено аналогію між процесами тепломасообміну з використанням числа Льюїса у період повного насичення теплового агенту вологою. Визначено теоретичні залежності коефіцієнтів внутрішньої дифузії досліджених матеріалів від температури теплового агенту під час фільтраційного сушіння та математичні моделі, що описують зміну вологовмісту матеріалу з часом в залежності від параметрів процесу. Окрім того, досліджено енергетичні характеристики зразків альтернативного твердого палива, виготовленого з осушеної вторинної сировини рослинного походження та показано перспективність їх практичного використання. Дисертаційна робота також розвиває теоретичні основи гідродинаміки стаціонарного шару вторинної рослинної сировини під час фільтраційного сушіння, зокрема шляхом доповнення критеріальних залежностей геометричним симплексом. Удосконалено теоретичні засади кінетики фільтраційного сушіння, запропоновано розрахункові залежності для прогнозування швидкості видалення вологи і тривалості процесу сушіння досліджуваних матеріалів.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Отримані результати мають практичну цінність, оскільки можуть бути застосовані для попередньої обробки рослинної вторинної сировини за допомогою фільтраційного сушіння з подальшим виготовленням альтернативного твердого палива і при цьому дозволяють прогнозувати гідравлічний опір шару, енергетичні витрати, зміну вологовмісту та тривалість процесу. Розроблені алгоритми розрахунку питомих енергетичних витрат дозволяють визначати оптимальні технологічно параметри процесу та економічну доцільність. Запропоновано апаратне оформлення процесу фільтраційного сушіння в промислових умовах. Отримані результати впроваджено у виробництво ТОВ «Інтер-Синтез» та передано для використання ТОВ «Вузьківський спиртовий завод», ТзОВ «Пивоварня «КУМПЕЛЬ», СП «Галка ЛТД», ТОВ «Вітагро Біо-Трейд», ТОВ «Крафтове пиво». Розроблені наукові положення та практичні рекомендації використано у навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при підготовці лекцій, лабораторних практикумів, під час курсового і дипломного проектування зі спеціальностей «Хімічні технології та інженерія» та «Харчові технології». Додатково практична цінність одержаних результатів підтверджується отриманим патентом України на винахід.

### **Загальна оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеність.**

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка складається з анотації на двох мовах зі списком опублікованих праць за темою дисертації, змісту, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 240 найменувань та додатків. Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до оформлення дисертацій (наказ МОН України №40 від 12.01.2017 р. із змінами, внесеними згідно з наказом № 759 від 31.05.2019 р.).

Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних основ гідродинаміки та кінетики тепломасообмінних процесів фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та створення на її основі зразків альтернативного твердого палива, дослідження основних характеристик альтернативного твердого палива на основі вторинної сировини рослинного походження, а також розроблення апаратурного оформлення. Мета досліджень досягнута, а всі поставлені завдання у дисертаційній роботі розв'язані повністю.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, об'єкт, предмет, задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення, наведені відомості про особистий внесок автора і апробацію отриманих результатів.

*Перший розділ* містить критичний огляд літератури, присвяченої використанню твердого палива та перспективам застосування вторинної рослинної сировини як його альтернативи. Розглянуто особливості та переваги фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів.

*Другий розділ* присвячено визначенню методології та методики досліджень. Представлено результати вибору та дослідження семи видів вторинної рослинної сировини, що мають потенціал для використання як альтернативне тверде паливо в умовах України. Визначено основні фізико-механічні характеристики семи матеріалів, які відрізняються за формою та структурою частинок: кукурудзяна післяспиртова барда, ячмінна пивна дробина, відходи кавового виробництва, буряковий жом, яблучні вичавки, жолуді дубу звичайного та плоди гіркокаштану звичайного. Наведено опис експериментальної установки фільтраційного сушіння, методики дослідження гідродинаміки теплового агенту, кінетики фільтраційного сушіння, визначення коефіцієнтів тепломасообміну та внутрішньої дифузії, теплотворних властивостей сировини, методики приготування брикетованого та гранульованого твердого палива, CFD-методів комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту, методики супутніх вимірювань (вологості, насипної густини, порізності) та оцінку похибок вимірювань.

У *третьому розділі* наведено результати досліджень гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної рослинної сировини під час

фільтраційного сушіння. Виведено залежності для визначення гідравлічного опору шару матеріалу для двох різних діапазонів висот стаціонарного шару матеріалу ( $H=80\div 120$  мм,  $H=90\div 110$  мм), рекомендованих для сушіння у промислових умовах. На підставі результатів експериментальних досліджень отримано залежності для розрахунку гідравлічного опору стаціонарного шару всіх досліджених матеріалів. За допомогою CFD-методів проведено комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агенту. Показано, що отримані залежності можна використовувати із прийнятною точністю для ширшого діапазону висот шару матеріалів. Також отримано узагальнені залежності між критерієм Ейлера та критерієм Рейнольдса для опису руху теплового агенту крізь шар вторинної рослинної сировини для досліджених висот стаціонарного шару матеріалу.

*Четвертий розділ* присвячено експериментальному дослідженню впливу основних параметрів процесу фільтраційного сушіння на зміну вологовмісту досліджуваних матеріалів. Розроблено узагальнені залежності для прогнозування зміни вологовмісту залежно від часу та режимів насичення теплового агенту вологою, а також визначено залежності для розрахунку тривалості процесу сушіння. Досліджено інтенсивність фільтраційного сушіння та встановлено, що вона не залежить від висоти шару матеріалу. Показано, що підвищення температури та швидкості теплового агенту сприяє збільшенню сушильного потенціалу.

*П'ятий розділ* дисертації містить результати експериментального визначення основних тепло- та масообмінних параметрів процесу фільтраційного сушіння вторинної рослинної сировини. Визначено середні значення коефіцієнтів тепловіддачі, для сухого та вологого шарів досліджених матеріалів. Експериментальні дані систематизовано та представлено у вигляді залежностей критеріїв Нуссельта та Шервуда для всіх досліджуваних матеріалів. Продемонстровано подібність процесів тепло- та масопередачі за допомогою числа Льюїса у період повного насичення теплового агенту вологою. Розраховано коефіцієнти внутрішньої дифузії та встановлено їх залежність від температури теплового агенту.

У *шостому розділі* наведено результати досліджень енергетичних характеристик вторинної рослинної сировини та показано перспективність її використання як альтернативного твердого палива. Виготовлено брикетовані та гранульовані зразки палива, визначено їх енергетичні характеристики. Встановлено, що брикетування сприяє підвищенню теплотворної здатності матеріалу. Виготовлені брикетовані зразки відповідають вимогам європейських стандартів до твердого палива.

У цьому розділі визначено оптимальні параметри процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі одержаних експериментальних даних. Запропоновано промислову установку фільтраційного сушіння та алгоритм розрахунку питомих енергетичних показників процесу. Розраховано питомі енергетичні показники процесу фільтраційного сушіння для всіх досліджених матеріалів. Доведено ефективність фільтраційного сушіння в порівнянні з барабанними сушарками, які зазвичай використовуються для сушіння біомаси.

У висновках до окремих розділів та загальних висновках до дисертаційної роботи викладаються здобуті у дисертації найбільш важливі наукові та практичні результати, які сприяли розв'язанню наукової проблеми з зазначенням кількісних показників одержаних результатів, обґрунтуванням достовірності результатів, формулюванням рекомендацій щодо їх практичного використання.

Додатки містять інші допоміжні і довідкові матеріали (таблиці та рисунки, що не увійшли до основного тексту дисертації), які необхідні для повноти сприйняття основного тексту дисертації, патент на винахід та акти впровадження у навчальний процес, акти впровадження та передачі результатів дисертації.

**Автореферат** ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем, а обсяг відповідає встановленим нормам. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам МОН України. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології. Представлена докторська дисертаційна робота не містить результатів, які відображені у кандидатській дисертації здобувача за темою «Окиснення циклогексану в присутності поверхнево-активних речовин» (спеціальність 05.17.04 — технологія продуктів органічного синтезу).

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

Основні положення та результати дисертаційної роботи у достатній мірі викладені в опублікованих 45 наукових працях, з них 22 статті у наукових фахових виданнях (у тому числі 16 статей у виданнях, які обліковуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, з них три статті у виданнях з квантилем Q1, та 6 статей у наукових фахових виданнях України), 4 розділи у колективних монографіях, 18 публікацій у матеріалах та працях конференцій, а також один патент України на винахід. Обсяг і зміст опублікованих праць повністю охоплює всі розділи дисертації, а також в достатній мірі відображає її зміст. Основні результати проведених здобувачем досліджень отримані самостійно, а особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві роботах є визначальним.

### **Висновок щодо академічної доброчесності.**

Аналіз рукопису дисертації свідчить про те, що робота містить результати оригінальних досліджень, проведених здобувачем. Дисертаційна робота містить необхідні посилання на наукові публікації інших авторів при використанні їх ідей і результатів, а цитування текстових фрагментів оформлено коректно. При проведенні досліджень автор дотримувався принципів академічної доброчесності. В дисертаційній роботі та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати, порушень академічної доброчесності (академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації) не виявлено.

### **Зауваження щодо змісту і оформлення дисертаційної роботи та автореферату, дискусійні положення:**

1. Механізм сушіння характеризується не лише кінетикою та динамікою, але також статикою. Статика процесу сушіння представляється у вигляді рівноважних залежностей, які в дисертаційній роботі не наведені.

2. У роботі не досліджено явище термодифузії, яке може виникати у шарі досліджених матеріалів.

3. При узагальненні експериментальних даних дослідження масообміну у шарі матеріалу (розділ 5) враховано лише числа Рейнольдса і Шмідта. Відомо, що на ці процеси також впливає температурний фактор, що враховується критерієм Гухмана, який у роботі не враховується.

4. У розділі 6 вказано, що теплотворні характеристики зростають при брикетуванні твердого палива з вторинної сировини рослинного походження, хоча у випадку використання жолудів теплотворна здатність зменшується (табл.6.7, табл.6.15 з дисертаційної роботи).

5. З тексту дисертації незрозуміло, чи враховувались втрати тепла у навколишнє середовище при розрахунку енергетичних показників процесу фільтраційного сушіння.

6. На с.8 з автореферату при описі вихідних умов та результатів комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження CFD-методами у програмному комплексі ANSYS слід було конкретизувати, яка саме математична модель обрана і використовувалася для моделювання пористого середовища? Які параметри шару є визначальними за вихідних умов? Наскільки застосування такої моделі є адекватним і однозначним для заданих умов?

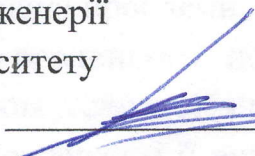
Вказані зауваження не стосуються принципів положень дисертаційної роботи, а тому не зменшують її науково-практичної цінності та значимості роботи в цілому. Слід також зазначити, що вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, а є лише дорадчими, дискусійними чи технічними.

### Загальний висновок по дисертаційній роботі.

Дисертаційна робота Іващука Олександра Сергійовича «Наукові основи тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології, що в сукупності розв'язують важливу науково-прикладну проблему, яка полягає у створенні наукових основ тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

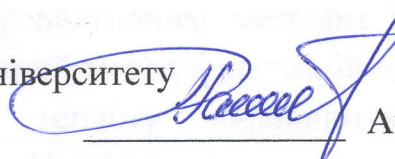
За актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, висновків та рекомендацій, отриманими новими результатами та їх практичною цінністю дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології та вимогам п.п. 7-9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор, Іващук Олександр Сергійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент,  
професор кафедри хімічної інженерії  
Сумського державного університету  
д.т.н., професор

 Олександр ЛЯПОЩЕНКО


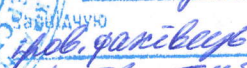

Підпис д.т.н., професора Олександра ЛЯПОЩЕНКА засвідчую:

Вчений секретар  
Сумського державного університету  
к.ф.-м.н., доцент



Анатолій РУБАН



відділу кадрів