

## 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, загальним обсягом 423 сторінки, основний текст роботи викладений на 357 сторінках, у тому числі 258 рисунків та 108 таблиць, складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків на 49 сторінках. Дисертаційна робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

### 1. Актуальність теми.

Споживання енергії в нашій країні вимагає створення нових генеруючих структур, глибокої трансформації енергетичної галузі на основі концепції «Smart Grid» з впровадженням проєктів розподільної генерації. При цьому дуже важлива роль відводиться використанню відновлюваних енергоресурсів місцевого походження. Україна має значні такі ресурси у вигляді вторинної сировини рослинного походження, в тому числі ті, які є відходами певних виробництв. Переважно, вторинна сировина рослинного походження має надлишкову вологість, що обмежує строк придатності, проблеми зі зберіганням та можливість цільового використання. Дослідження тепломасообмінних закономірностей попереднього сушіння вторинної сировини рослинного походження за допомогою високоефективного фільтраційного методу дозволяє закласти наукові основи попередньої підготовки вторинної сировини рослинного походження для виготовлення альтернативного твердого палива, що у свою чергу є ще одним кроком до раціонального природокористування та залучення в енергетику великої кількості вторинної сировини рослинного походження.

Зважаючи на вищенаведене, тема дисертаційної роботи Іващука О.С. є, поза сумнівом, актуальною.

### 2. Ступінь обґрунтованості наукових положень і результатів.

Аналіз результатів дисертаційної роботи дає змогу зробити висновок, що рукопис є логічною та аргументованою науковою працею. Наукові положення, висновки, рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, теоретично обґрунтовані, а їх достовірність підтверджується результатами

експериментальних досліджень, що мають теоретичне підґрунтя. Усі висновки базуються на великому масиві експериментальних даних, одержаних з використанням сучасних стандартних і науково обґрунтованих методів досліджень.

### **3. Наукова новизна проведеного дослідження.**

Всі положення і результати, сформульовані автором у пункті «Наукова новизна одержаних результатів», є новими та вперше отримані і описані Івашуком О.С.. Зокрема, дисертантом вперше:

- експериментально досліджено гідродинаміку, кінетику і динаміку фільтраційного сушіння семи різних за формою, дисперсністю і структурною будовою частинок вторинної сировини рослинного походження та вплив на швидкість видалення вологи за різної висоти шарів висушуваних матеріалів, швидкості руху теплового агента, його початкової температури;
  - отримано критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів зовнішнього теплообміну у стаціонарному шарі для досліджуваних матеріалів;
  - отримано критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів масообміну у стаціонарному шарі для досліджуваних матеріалів;
  - встановлено аналогію між зовнішнім теплообміном та масообміном з використанням числа Льюїса для досліджуваних матеріалів;
  - отримано теоретичні залежності, які дають змогу для досліджуваних матеріалів визначати коефіцієнти внутрішньої дифузії під час фільтраційного сушіння;
  - отримано математичні залежності, які описують зміну вологовмісту вторинної сировини рослинного походження в часі та тривалість процесу фільтраційного сушіння за різних параметрів процесу: висоти шару вологого матеріалу, температури теплового агента, швидкості руху теплового агента;
  - досліджено основні теплофізичні та енергетичні характеристики зразків альтернативного твердого палива із осушеної фільтраційним методом вторинної сировини рослинного походження.
- Окрім того, у дисертаційній роботі набули подальшого розвитку теоретичні основи:
- гідродинаміки стаціонарного шару вторинної рослинної сировини під час фільтраційного сушіння, зокрема доповнено геометричним симплексом критеріальні залежності, які характеризують внутрішню задачу гідродинаміки, визначено невідомі коефіцієнти модифікованого рівняння Ергана для досліджуваних матеріалів;
  - кінетики фільтраційного сушіння, зокрема розрахункові залежності, які дають змогу прогнозувати швидкість видалення вологи та час досягнення кінцевої вологості досліджуваних матеріалів.

#### 4. Практична цінність отриманих результатів.

Практична значимість одержаних результатів не викликає сумнівів, оскільки одержані результати дають змогу визначати оптимальні технологічні режими попередньої підготовки і фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та подальшого виготовлення з неї альтернативного твердого палива. Зокрема:

– отримані за результатами експериментальних досліджень критеріальні рівняння гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння та модифіковане рівняння Ергана дають змогу прогнозувати гідравлічний опір шару та енергетичні витрати на створення перепаду тиску для кожного дослідженого матеріалу;

– використання комп'ютерної моделі гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння, дозволяє суттєво зменшити об'єм експериментальних досліджень, в тому числі за межами інтервалу, де такі експериментальні дослідження ще не проводилися;

– отримані за результатами експериментальних досліджень кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження математичні залежності дають змогу прогнозувати зміну вологовмісту у часі для кожного дослідженого матеріалу та тривалість процесу фільтраційного сушіння;

– отримані за результатами експериментальних досліджень дані про основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження дають змогу рекомендувати його практичне використання;

– розроблені алгоритми розрахунку питомих енергетичних витрат процесу фільтраційного сушіння дають змогу визначати технологічно доцільні параметри процесу та економічну ефективність осушення вторинної сировини рослинного походження фільтраційним методом;

– на основі одержаних результатів експериментальних і теоретичних досліджень, їх аналізу та узагальнення, запропоновано технологічну схему та апаратне оформлення процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового використання.

Практична реалізація одержаних результатів підтверджується їх впровадженням у виробництво на ТОВ «Інтер-Синтез» (м. Борислав), а також передачею результатів досліджень для впровадження у виробництво на ТОВ «Вузлівський спиртовий завод» (с. Вузлове, Львівська обл.), ТзОВ «Пивоварня

«КУМПЕЛЬ» (м. Львів), СП «Галка ЛТД» (м. Львів), ТОВ «Вітагро Біо-Трейд» (Марилівський спиртзавод) (с. Нагірянкa, Тернопільська обл.), ТОВ «Крафтове пиво» (броварня «ЦИПА») (с. Кваси, Закарпатська область), що підтверджено відповідними актами.

Основні положення дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» підготовки студентів зі спеціальностей 161 Хімічні технології та інженерія, 181 Харчові технології, у лекційному курсі та лабораторному практикумі навчальних дисциплін «Процеси та апарати хімічної технології», «Процеси та апарати харчових виробництв», «Моделювання гідромеханічних процесів», а також під час курсового та дипломного проектування, що підтверджено відповідним актом.

Новизна та практична цінність також підтверджується отриманим дисертантом патентом України на винахід.

#### **5. Публікації та апробація результатів роботи.**

За темою дисертації автором опубліковано 45 наукових праць, з яких 16 входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science (з них 3 – у журналах квартилю Q1), 6 до фахових видань України; 1 патент України на винахід, 4 розділи у колективних монографіях, 18 матеріалів тез доповідей.

**6. Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації** підтверджується повною мірою, автореферат містить тільки ті положення, які є у тексті рукопису дисертації. Дисертаційна робота не містить результатів, які відображені у кандидатській дисертації.

#### **7. Структура, зміст та загальна характеристика роботи.**

Дисертаційна робота Іващука Олександра Сергійовича складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до дисертаційних робіт МОН України (наказ № 40 від 12.01.2017 р. (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України № 759 від 31.05.2019 р.).

**Метою 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 теплофізичних та енергетичних характеристик альтернативного твердого палива на основі вторинної сировини рослинного походження, а також розроблення апаратурного оформлення для сушіння вторинної сировини рослинного походження. Мета роботи та завдання для її досягнення виконані повністю.

Наведені автором висновки та рекомендації підтверджені матеріалами експериментальних досліджень та публікаціями.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, відображено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, окреслено внесок здобувача, наведено відомості про зв'язок роботи із науковими програмами, публікації та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** виконано критичний аналіз літературних джерел, які присвячено дослідженням з використання твердого палива та можливостей застосування вторинної сировини рослинного походження як альтернативного твердого палива. Проаналізовано особливості та переваги фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір досліджуваної вторинної сировини рослинного походження. Подано основні характеристики обраних матеріалів, що необхідні для аналізу та обробки результатів дослідження їх фільтраційного сушіння. Описано принцип роботи експериментальної установки. Наведено методики проведення експериментальних досліджень та вимірювань. Наведено інформацію про оцінку похибок вимірювання.

**Третій розділ** присвячено експериментальним дослідженням гідродинаміки руху потоку теплового агенту через стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння. Виведено залежності для визначення гідравлічного опору стаціонарного шару вторинної сировини рослинного походження для висот шару матеріалу  $H = 80 \div 120$  мм та  $H = 90 \div 110$  мм. Виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту через стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження у програмі ANSYS Fluent 2022 R2. Показано, що усереднене відхилення результатів моделювання не перевищує 10 %. Виконано узагальнення залежностей критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної рослинної сировини для досліджених висот шару матеріалів.

У **четвертому розділі** згідно з наведеними вище методиками виконано експериментальні дослідження для встановлення впливу основних параметрів процесу фільтраційного сушіння (висоти вологого матеріалу, температури теплового агенту, швидкості руху теплового агенту) на зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі. Запропоновано узагальнюючі залежності для визначення зміни вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі для періодів повного та часткового насичення теплового агенту вологою, визначено залежності тривалості процесу фільтраційного сушіння. Визначено відносні відхилення відповідності експериментальних даних до теоретично

розрахованих згідно запропонованих узагальнюючих залежностей. Показано, що розраховані відносні відхилення є допустимими для практичних розрахунків сушильного обладнання. Виконано дослідження інтенсивності фільтраційного сушіння досліджених матеріалів. Показано, що для досліджених матеріалів висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом. Визначено, що сушильний потенціал теплового агенту для фільтраційного сушіння можна збільшити за рахунок підвищення температури та швидкості руху теплового агенту.

У **п'ятому розділі** наведено результати експериментальних досліджень визначення основних тепло- та масообмінних коефіцієнтів для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Визначено усереднені коефіцієнти тепловіддачі для сухого та вологого шару вторинної сировини рослинного походження. Експериментальні дані узагальнено визначеними залежностями критеріїв Нуссельта та Шервуда для усіх досліджених матеріалів. Показано подібність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі з використанням числа Льюїса у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час процесу фільтраційного сушіння. Визначено коефіцієнти внутрішньої дифузії для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження та узагальнено їх залежності від температури теплового агенту за допомогою розрахункових залежностей.

У **шостому розділі** визначено енергетичні характеристики вторинної сировини рослинного походження. Показано перспективність використання досліджуваної вторинної сировини рослинного походження як альтернативного твердого палива. Виготовлено брикетовані та гранульовані зразки створеного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження, визначено енергетичні характеристики створених твердопаливних зразків. Показано, що у сформованих брикетованих зразків спостерігається підвищення показників вищої теплотворної здатності у порівнянні із несформованою сировиною. Визначено, що виготовлені брикетовані зразки відповідають існуючим вимогам європейських стандартів до твердого палива.

У **сьомому розділі** визначено технологічно доцільні параметри процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі проведених експериментальних досліджень. Запропоновано установку фільтраційного сушіння для промислового проведення процесу сушіння вторинної сировини рослинного походження та алгоритм розрахунку питомих енергетичних показників процесу фільтраційного сушіння для промислового проведення процесу. Розраховано питомі енергетичні витрати для усіх досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу. Показано ефективність використання

процесу фільтраційного сушіння порівняно із барабанними сушарками, що широко використовуються для сушіння біомаси.

**Висновки** дисертації є ґрунтовними і базуються на результатах, одержаних дисертантом особисто, висвітлюють наукову новизну та практичну цінність результатів роботи.

**Додатки** містять таблиці та рисунки, які винесено за основний текст дисертації, патент на винахід, а також акти впровадження у навчальний процес та виробництво.

**8. Зміст реферату повністю відповідає основним положенням дисертації.** Реферат містить лише ту інформацію, яка представлена в тексті дисертації. Дисертаційна робота не містить жодних результатів, які були б відображені в кандидатській дисертації.

**9. Дотримання принципів академічної доброчесності.**

Рукопис містить результати власних досліджень Іващука О.С. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні.

**10. Зауваження до дисертаційної роботи та дискусійні положення**

1. При виборі основних досліджуваних типів вторинної сировини рослинного походження було б доцільно дати більш детальну оцінку їх теоретично-можливого, технічно-доступного та економічно-доцільного потенціалів, а також рівень конкурентоспроможності у порівнянні з іншими видами відновлюваних джерел енергії та викопних енергоресурсів;

2. У роботі не наведено обґрунтування вибору програмного забезпечення для проведення процесу комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної сировини рослинного походження.

3. Питома площа поверхні дисперсних матеріалів є одним з найважливіших параметрів, від якого залежать кінетичні та тепломасообмінні показники процесу сушіння. В роботі для всіх видів зразків досліджуваної сировини питома площа визначається з використанням мікроскопічного методу. Ураховуючи неправильність геометричних форм часточок матеріалів, такий метод визначення може давати високу похибку.

4. У роботі не наведено розширеного обґрунтування використання осушеного шару досліджуваних матеріалів у процесі дослідження закономірностей гідродинаміки процесу фільтраційного сушіння.

5. Результати експериментальних досліджень та розрахунків у таблицях дисертації подаються з різною кількістю знаків після коми, наприклад

у табл. 4.1 та 4.2. На стор. 55 описка - критерій Нусельта означений як критерій Прандтля.

6. У роботі не наведено геометричних розмірів створених зразків брикетованого твердого палива із вторинної сировини рослинного походження та аналізу їх впливу на процеси горіння. Також не наведено результатів досліджень міцності виготовлених шляхом пресування брикетів, яка є важливою споживчою характеристикою, особливо при транспортуванні.

7. Для кращого розуміння економічного ефекту доцільно було додати розрахунок ефективності використання в порівнянні з іншими поширеними типами промислових сушильних установок.

8. Всі дослідження проведено для стаціонарного шару. Але під час сушіння можливі зміни геометричних розмірів часточок, площ і якості їх поверхонь, геометрії каналів фільтрації та висоти шару. Це може призводити до зміни гідродинамічних та тепломасообмінних показників процесу сушіння. Автором не надано пояснень, як це ураховується в реальних сушильних процесах.

Вказані зауваження не зменшують наукової новизни та практичної цінності дисертаційної роботи, не стосуються самої суті роботи, носять дискусійний та рекомендаційний характер.

### **Висновок**

Вважаю, що 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 одержано науково обґрунтовані результати, які вирішують важливу науково-практичну проблему – дослідження тепломасообмінних процесів під час попередньої підготовки вторинної сировини рослинного походження за допомогою енергоощадного методу фільтраційного сушіння та створення з неї альтернативного твердого палива.

Дисертаційна робота Іващука Олександра Сергійовича «Наукові основи тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження» відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 14 вересня 2011 року №1057) та вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук згідно пп. 7–9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, 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,  
член-кореспондент НАН України,  
завідувач відділу комплексних енерготехнологій  
Інституту енергетичних машин і систем  
ім. А. М. Підгорного НАН України  
д.т.н., с.н.с.

Олег КРАВЧЕНКО

Підпис д.т.н., с.н.с. Олега КРАВЧЕНКА засвідчую:

Учений секретар  
Інституту енергетичних машин і систем  
ім. А. М. Підгорного НАН України  
д.т.н., с.н.с.



Сергій УГРИМОВ