

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ІВАЩУК ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 66.04

**НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС
ВИРОБНИЦТВА АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА З
ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник, член-кореспондент НАН України
КРАВЧЕНКО Олег Вікторович
Інститут енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного НАН України
завідувач відділу комплексних енерготехнологій

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник, професор
ЦИГАНКОВ Сергій Петрович
Державна установа «Інститут харчової біотехнології та
геноміки Національної академії наук України»
заступник директора з наукової роботи

доктор технічних наук, професор
ЛЯПОЩЕНКО Олександр Олександрович
Сумський державний університет
професор кафедри хімічної інженерії

Захист відбудеться «17» березня 2025 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.09 при Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери 12, головний корпус, ауд. 226.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська 1.

Реферат розісланий «14» лютого 2025 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент



Зоряна ГНАТІВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. За умов перманентного зростання енергоспоживання людським суспільством зростає також потреба в енергоносіях. За таких умов збільшується використання різних енергетичних ресурсів, в тому числі і традиційного твердого палива, частка та об'єми споживання якого також зростають. Збільшення використання традиційного твердого палива – насамперед викопного вугілля та деревини – призводить до неунікненого погіршення екологічної ситуації у світі та є однією із причин зміни клімату на планеті. Таким чином, є нагальна потреба у розвитку сировинних джерел, що можуть бути використані як альтернативне тверде паливо. Такими джерелами в Україні є насамперед швидкоростучі рослини та відходи сільського господарства. Проте, використання швидкоростучої рослинної сировини вимагає додаткової спеціальної культивуації на сільськогосподарських угіддях та часових затрат. Відходи сільського господарства, наприклад подрібнені стебла соняшника, зазвичай мають меншу теплотворну здатність та високі значення зольності, пов'язані із недостатньою чистотою вихідної сировини.

З іншого боку, на території України є вторинна сировина рослинного походження, що має перспективи для використання як альтернативне тверде паливо. По-перше, це промислові органічні відходи рослинного походження, які утворюються у значних кількостях на підприємствах України, наприклад післяспиртова барда виробництв етилового спирту, пивна дробина пивоварень, відходи виробництва кави, фруктовий та овочевий жом. Ця вторинна сировина рослинного походження має надлишкову вологість $> 65\%$ мас., у зв'язку з чим тривале її зберігання та використання ускладнене. Псууючись, дані відходи промисловості шкодять довкіллю, ґрунтам, ґрунтовим водам. По-друге, в Україні є природна рослинна сировина, що є загальнодоступною у лісових та паркових зонах і має теоретичний потенціал для використання як альтернативне тверде паливо – це плоди дубу та гіркокаштану, що широко поширені на території нашої держави. Ця вторинна сировина рослинного походження також містить надлишкову природну вологість.

Для попереднього осушення вищезгаданої сировини рослинного походження перспективним є застосування методу фільтраційного сушіння, що є високоефективним з огляду на принцип проведення процесу. Проте відомостей про тепломасообмінні закономірності під час сушіння вторинної сировини рослинного походження недостатньо і дане питання вимагає проведення експериментальних досліджень, що відносяться до фундаментальних проблем гідромеханіки, теорії тепло- та масопередачі, оскільки на їх основі вирішуються наукові та технічні задачі, що виникають при розрахунках процесів та проектуванні обладнання хімічної технології. У зв'язку з цим, тема дисертації є актуальною, має наукове і практичне значення, оскільки спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає в створенні теоретичних основ тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри хімічної інженерії Національного університету «Львівська політехніка», які проводяться у відповідності з основними напрямками наукової діяльності Національного університету «Львівська політехніка»: «Гідродинаміка і тепломасообмін в системі «тверде тіло – газ», «тверде тіло – рідина» (номер державної реєстрації 0117U004122), «Чисельне моделювання гідромеханічних, хімічних, тепло- і масообмінних процесів» (номер державної реєстрації 0117U004123). Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетної теми «Створення взірців високоефективного альтернативного твердого палива з відходів харчової промисловості рослинного походження» (БФ-2-2023, номер державної реєстрації 0123U104178). Автор дисертаційної роботи був виконавцем цієї держбюджетної теми. Дисертаційна робота була виконана за підтримки проєкту Horizon Europe «Підтримка європейських досліджень і розробок через співпрацю із зацікавленими сторонами та інституційну реформу» («SupportING European R&I Through stakeholder collaboration And insTitutional rEform», INITIATE, HORIZON-WIDERA-2023-ACCESS-03, номер проєкту 101136775). Автор дисертаційної роботи є виконавцем цього проєкту.

Мета і завдання досліджень. 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 характеристик альтернативного твердого палива на основі вторинної сировини рослинного походження, а також розроблення апаратурного оформлення для сушіння вторинної сировини рослинного походження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- обґрунтувати вибір вторинної сировини рослинного походження, що є перспективною з огляду використання для виготовлення альтернативного твердого палива;
- встановити закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння;
- виконати комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння;
- узагальнити закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння;
- встановити та узагальнити закономірності кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження;
- встановити та узагальнити закономірності динаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження;
- узагальнити результати експериментальних досліджень зовнішнього тепломасообміну процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження;

- обґрунтувати перспективність використання альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження;
- виготовити дослідні зразки альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження та визначити основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження;
- обґрунтувати технологічно доцільні параметри сушильного обладнання для проведення процесу фільтраційного сушіння;
- запропонувати апаратне оформлення процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.

Об’єкт досліджень – процес фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Предмет дослідження – гідродинаміка руху теплового агенту, кінетика фільтраційного сушіння, динаміка фільтраційного сушіння, фізичні та математичні моделі тепломасообміну, основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива, розрахунок параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи фізичного, математичного і комп’ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту, кінетики та динаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Згідно стандартизованих методик виконували визначення параметрів досліджуваних матеріалів: вологості, насипної густини, порізності шару. Для дослідження поверхні вторинної сировини рослинного походження використовували методи вимірювання мікроскопічним методом. Зразки альтернативного твердого палива виготовляли за допомогою методів брикетування та гранулювання. Теплотворні характеристики досліджуваних матеріалів визначали методом калориметрії. Для розв’язку диференціальних рівнянь використовували числові та аналітичні методи. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою систем комп’ютерної алгебри та кінцево-елементного аналізу із використанням прикладних програмних пакетів та спеціалізованого програмного забезпечення: Microsoft Office 365, Autodesk AutoCAD, Grapher, PTC MathCAD, ANSYS Fluent та ін.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- експериментально досліджено гідродинаміку, кінетику і динаміку фільтраційного сушіння семи різних за формою і структурною будовою частинок вторинної сировини рослинного походження та вплив на швидкість видалення вологи за різної висоти шару висушуваного матеріалу, швидкості руху теплового агенту, 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 агенту, швидкості руху теплового агенту;
- досліджено основні енергетичні характеристики зразків альтернативного твердого палива із осушеної фільтраційним методом вторинної сировини рослинного походження.

Набули подальшого розвитку теоретичні основи:

- гідродинаміки стаціонарного шару вторинної рослинної сировини під час фільтраційного сушіння, зокрема критеріальні залежності, доповнені геометричним симплексом, які характеризують внутрішню задачу гідродинаміки та визначені 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.

Практичне значення одержаних результатів:

- 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;
- отримано результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення ANSYS Fluent;
- 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 узагальнення теоретичних досліджень та експериментальних даних запропоновано апаратне оформлення технологічного процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового використання;
- практична реалізація одержаних результатів полягає у передачі результатів досліджень ДП «Вузлівський спиртовий завод» (с. Вузлове, Львівська обл.), ТзОВ «Пивоварня «КУМПЕЛЬ» (м. Львів), СП «Галка ЛТД» (м. Львів), ТОВ «Вітагро Біо-Трейд» (Марилівський спиртзавод) (с. Нагірянка, Тернопільська обл.), ТОВ «Крафтове пиво» (броварня «ЦИПА») (с. Кваси, Закарпатська область), ТОВ «Інтер-Синтез» (м. Борислав) для впровадження у виробництво, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, в аналізі наукової літератури за темою дисертації, в обґрунтуванні і розробці основної ідеї та теми дисертації, у розробці наукових положень і методик експериментальних досліджень, у виконанні експериментальних досліджень, у фізичному, математичному та комп'ютерному моделюванні, обробці, аналізі результатів експериментальних даних, у формулюванні основних теоретичних положень та висновків. Внесок автора у вирішення завдань, що виносяться на захист є основним.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертації та її результати були оприлюднені та обговорені на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, зокрема: Міжнародній конференції «Chemical Technology and Engineering» (м. Львів, 21-24 червня 2021 р., 26-29 червня 2023 р.), XII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, 26-27 жовтня 2021 р.), Міжнародному молодіжному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 10-11 лютого 2022 р., 28-29 березня 2024 р.), Європейській конференції молодих інженерів (м. Варшава, Польща, 4-6 квітня 2022 р., 17-19 квітня 2023 р., 15-17 квітня 2024 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості» (м. Львів, 16-20 травня 2022 р., 20-24 травня 2024 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях» (м. Дніпро, 23-24 червня 2022 р.), VII Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 12-14 жовтня 2022 р.), 4-тій Міжнародній конференції «Advanced polymer materials and technologies» (м. Львів, 11-12 жовтня 2022 р.), IV Міжнародному науковому симпозіумі «Сталий розвиток – стан та перспективи» (м. Львів – с. Славсьько, 13-16 лютого 2024 р.), 2-ій Міжнародній конференції «Матеріали та технології в інженерії» (м. Луцьк, 14-16 травня 2024 р.), XX Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (м. Одеса, 9-13 вересня 2024 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 45 наукових працях, з яких 22 статті (16 статей у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, з них 3 – Q1, та 6 статей у наукових фахових виданнях України), 1 патент України на винахід, 4 розділи у колективних монографіях та 18 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, який включає 240 найменувань і додатків. Робота викладена на 357 сторінках основного тексту, містить 258 рисунків, 108 таблиць та додатки на 49 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, яка вирішується у дисертаційній роботі, сформульовано мету і задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості щодо особистого внеску здобувача та апробації результатів досліджень.

У **першому розділі** виконано критичний аналіз джерел літератури, що стосується основних аспектів щодо перспективності використання вторинної сировини рослинного походження як альтернативного твердого палива; переваг, особливостей механізму та тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів. Наприкінці розділу визначено мету роботи та основні завдання, які необхідно було вирішити для досягнення поставленої мети.

У **другому розділі** зроблено вибір об'єктів досліджень вторинної сировини рослинного походження, що є доступною на території України, перспективною з огляду потенційного використання як альтернативне тверде паливо та містить надлишкову вологість; наведено її основні фізико-механічні характеристики. Як об'єкти досліджень було обрано сім матеріалів, різних за формою і структурною будовою частинок: кукурудзяну післяспиртову барду, ячмінну пивну дробину, відходи кавового виробництва, буряковий жом, яблучні вичавки, жолуді дуба звичайного (*Quercus robur L.*), плоди гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*).

Наведено опис та принцип роботи експериментальної установки фільтраційного сушіння, наведено методики проведення експериментальних досліджень (гідродинаміки руху теплового агенту, кінетики та динаміки фільтраційного сушіння; визначення коефіцієнтів тепломасообміну, коефіцієнтів внутрішньої дифузії та теплотворних властивостей вторинної сировини рослинного походження; методики приготування брикетованих та гранульованих зразків твердого палива з осушеної вторинної сировини рослинного походження), комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар стаціонарного матеріалу; супутніх вимірювань (визначення вологості, насипної густини, порізності шару вторинної сировини рослинного походження), а також оцінку похибок вимірювання.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння. Було досліджено зміну гідравлічного опору шару матеріалу залежно від швидкості руху теплового агенту для рекомендованих значень висоти шару матеріалу за сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм із кроком 10 мм, та $H = 90 \div 110$ мм із кроком 5 мм. Звуження меж досліджуваних висот шару матеріалу мало на меті уточнити характер зміни гідравлічного опору, а також зробити висновок про вплив зміни досліджуваних меж на одержані результати. У роботі досліджено сім матеріалів, обраних у розділі 2; для прикладу наведено результати дослідження кукурудзяної післяспиртової барди (рис. 1).

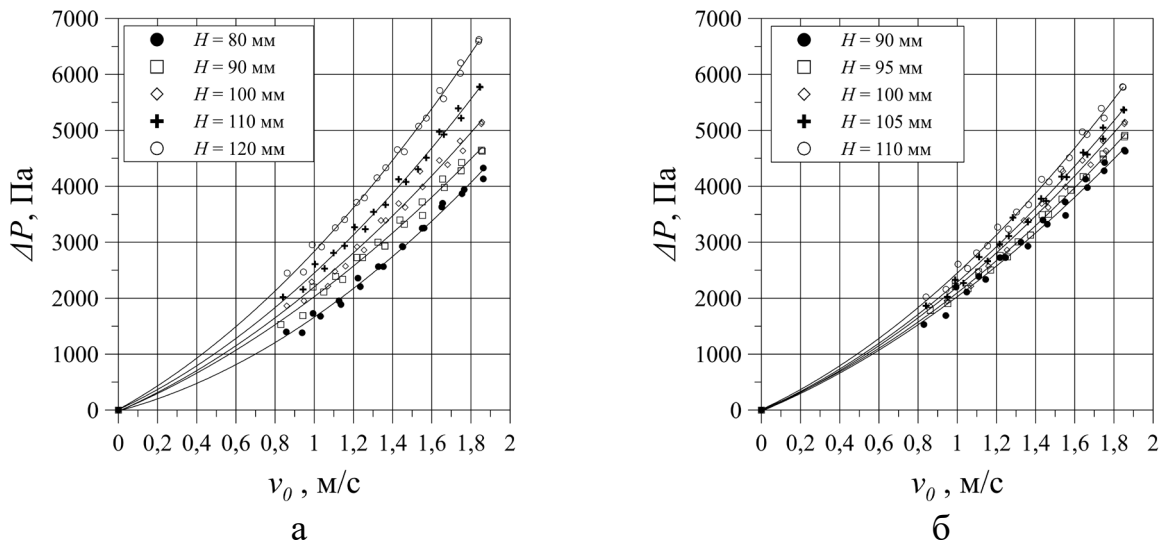


Рис. 1. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($T = 16$ °C, $v_0 = 0,83 \div 1,86$ м/с): а) $H = 80 \div 120$ мм; б) $H = 90 \div 110$ мм.

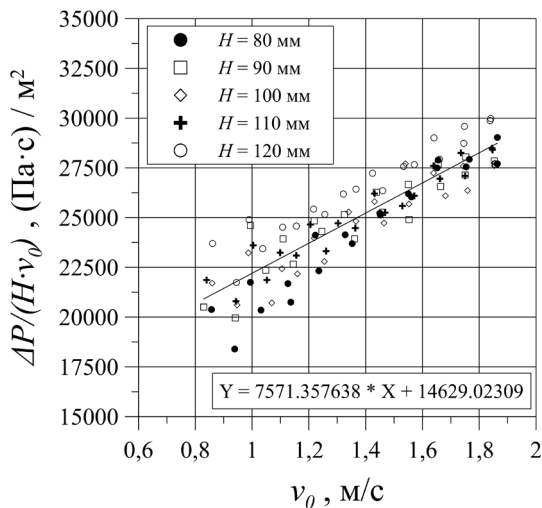


Рис. 2. Графічна залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 16$ °C, $v_0 = 0,83 \div 1,86$ м/с)

Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару досліджуваних матеріалів від зміни фіктивної швидкості теплового агенту, одержана на основі експериментальних даних, свідчить про те, що гідравлічний опір шару зростає із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості руху потоку теплового агенту (рис. 1).

З огляду на модифіковане рівняння Дарсі–Вейсбаха (рівняння Ергана) було побудовано графічні залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ (рис. 2), та за допомогою аналізу усередненої лінії

для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу визначено рівняння для визначення ΔP для шару досліджуваних матеріалів (табл. 1). Аналогічні рівняння було визначено для проміжку висот досліджуваних матеріалів $H = 90 \div 110$ мм.

Таблиця 1. Рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару $H = 80 \div 120$ мм

Дослідний матеріал	Розрахункові залежності
Кукурудзяна післяспиртова барда	$\Delta P = 14629,02 \cdot H \cdot v_0 + 7571,36 \cdot H \cdot v_0^2$
Ячмінна пивна дробина	$\Delta P = 27655,11 \cdot H \cdot v_0 + 47046,56 \cdot H \cdot v_0^2$
Відходи виробництва кави	$\Delta P = 63970,68 \cdot H \cdot v_0 + 31810,12 \cdot H \cdot v_0^2$
Буряковий жом	$\Delta P = 13473,57 \cdot H \cdot v_0 + 9602,22 \cdot H \cdot v_0^2$
Яблучні вичавки	$\Delta P = 3073,57 \cdot H \cdot v_0 + 3397,46 \cdot H \cdot v_0^2$
Жолуді	$\Delta P = 44893,2 \cdot H \cdot v_0 + 26321,85 \cdot H \cdot v_0^2$
Каштани	$\Delta P = 21852,26 \cdot H \cdot v_0 + 12958,51 \cdot H \cdot v_0^2$

За результатами одержаних експериментальних даних виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Зважаючи на особливість досліджуваного матеріалу, процес комп'ютерного моделювання проводили використовуючи метод пористих середовищ із використанням визначених параметрів шару. Геометричну область розрахунку створювали у препроцесорі *ANSYS Design Modeler*, відповідно до фактичних розмірів внутрішнього об'єму циліндричного контейнера (рис. 3, а) експериментальної установки фільтраційного сушіння. Розташування областей у контейнері створеної моделі подано на рис. 3, б. Кількість елементів сітки області моделювання становила орієнтовно 490 000 елементів, кількість вузлів становила 91 000 (рис. 3, в).

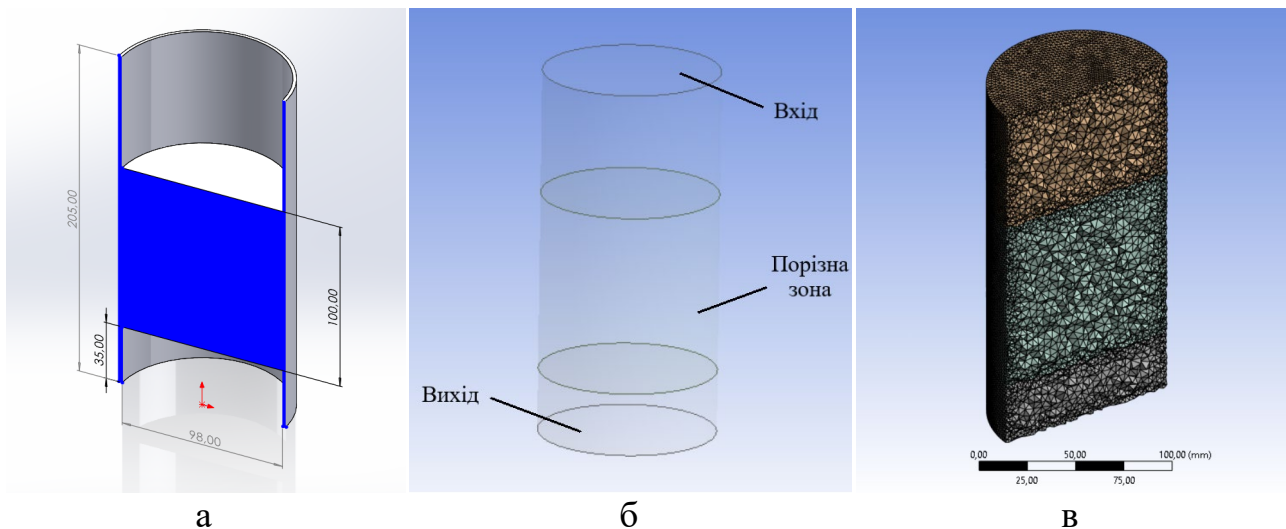
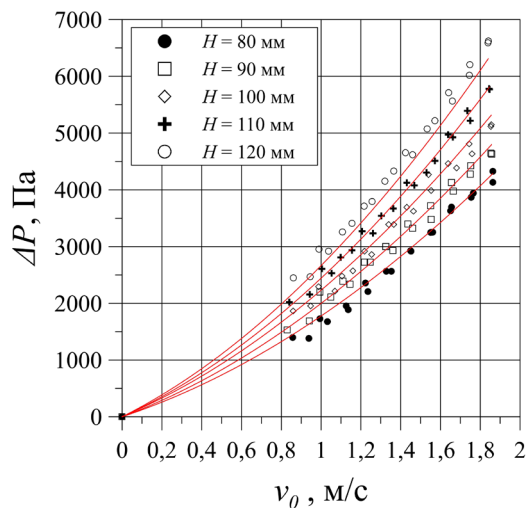


Рис. 3. Геометрична область для розрахунку комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження: а) геометричні розміри моделі циліндричного контейнера; б) поділ області комп'ютерного моделювання; в) сіткова модель розрахункової області моделювання



Отримані в результаті комп'ютерного моделювання графічні залежності (рис. 4), свідчать про відповідність розрахованих значень гідралічного опору шару досліджених матеріалів до значень, одержаних експериментальним шляхом. У табл. 2 наведено значення усереднених відхилень результатів виконаного моделювання щодо отриманих експериментальним шляхом значень гідралічного опору шару дослідженої вторинної сировини рослинного походження для проміжків досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм. Як свідчить аналіз табл. 2, усереднені відхилення комп'ютерного моделювання гідралічного опору шару досліджених матеріалів не перевищують 9 %, що свідчить про адекватність використаних моделей. Звуження меж досліджуваного шару висот та кроку висот зменшує усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання. Порівняння одержаних усереднених відхилень для різних висот також вказує, що результати знаходяться в допустимих межах (< 10 %), що дає змогу стверджувати, що одержані рівняння для прогнозування гідралічного опору шару дослідженої вторинної сировини рослинного походження можна використовувати для ширшого діапазону висот шару матеріалів для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Таблиця 2. Усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання відносно експериментальних даних, %

Дослідний матеріал	$H = 80 \div 120$ мм	$H = 90 \div 110$ мм
Кукурудзяна післяспиртова барда	3,71	2,72
Ячмінна пивна дробина	6,85	2,91
Відходи виробництва кави	8,92	4,28
Буряковий жом	4,09	2,19
Яблучні вичавки	8,28	7,56
Жолуді	4,47	2,64
Каштани	1,92	1,78

Одержані експериментальні дані гідродинаміки руху теплового агенту доцільно представити для узагальнення у безрозмірній формі. Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового

агенту вказує на те, що критерій Ейлера залежить від висоти шару матеріалу, а експериментальні значення критерію Ейлера з достатньою точністю добре апроксимуються степеневою залежністю $Eu = A \cdot Re^n$ (рис. 5). З огляду на те, що константи A є різними для різних висот шару матеріалів, узагальнюємо значення даних констант для усього діапазону досліджуваних висот шару за допомогою графічних залежностей $A = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$ (рис. 6).

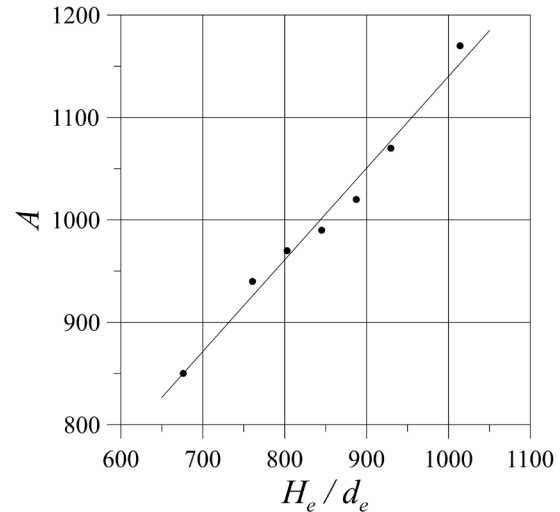
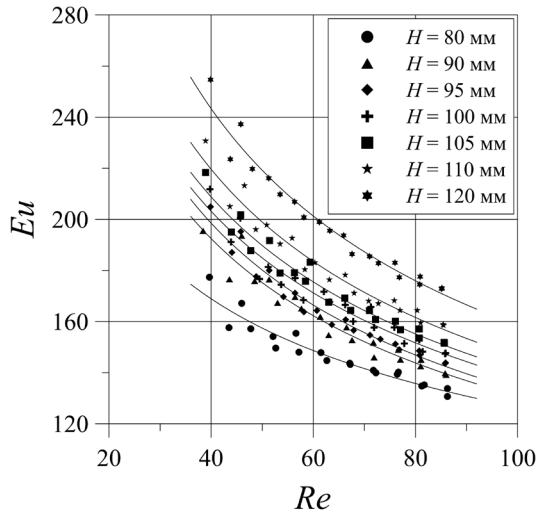


Рис. 5. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агента крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди

Рис. 6. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агента крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди

Визначені залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса виду $Eu = A \cdot Re^n \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^m$ для дослідженої вторинної сировини рослинного походження наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Рівняння, що характеризують залежність критерію Eu від критерію Re для $H = 80 \div 120$ мм та усереднені відхилення розрахункових значень від експериментально одержаних

Дослідний матеріал	Розрахункові залежності	Відхилення, %
Кукурудзяна післяспиртова барда	$Eu = 1,2 \cdot Re^{-0,43} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	3,93
Ячмінна пивна дробина	$Eu = 25 \cdot Re^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	6,36
Відходи виробництва кави	$Eu = 40 \cdot Re^{-0,59} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	7,75
Буряковий жом	$Eu = 250 \cdot Re^{-0,48} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	1,59
Яблучні вичавки	$Eu = 0,38 \cdot Re^{-0,25} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	6,73

Дослідний матеріал	Розрахункові залежності	Відхилення, %
Жолуді	$Eu = 1,6 \cdot Re^{-0,55} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	4,29
Каштани	$Eu = 75 \cdot Re^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e}$	2,52

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Виконано дослідження впливу основних параметрів процесу (висота вологого матеріалу H , температура теплового агента T , швидкість руху теплового агента v_0) на зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі та подальше узагальнення одержаних даних. У роботі досліджено сім матеріалів, обраних у розділі 2; для прикладу наведено результати дослідження кукурудзяної післяспиртової барди (рис. 7).

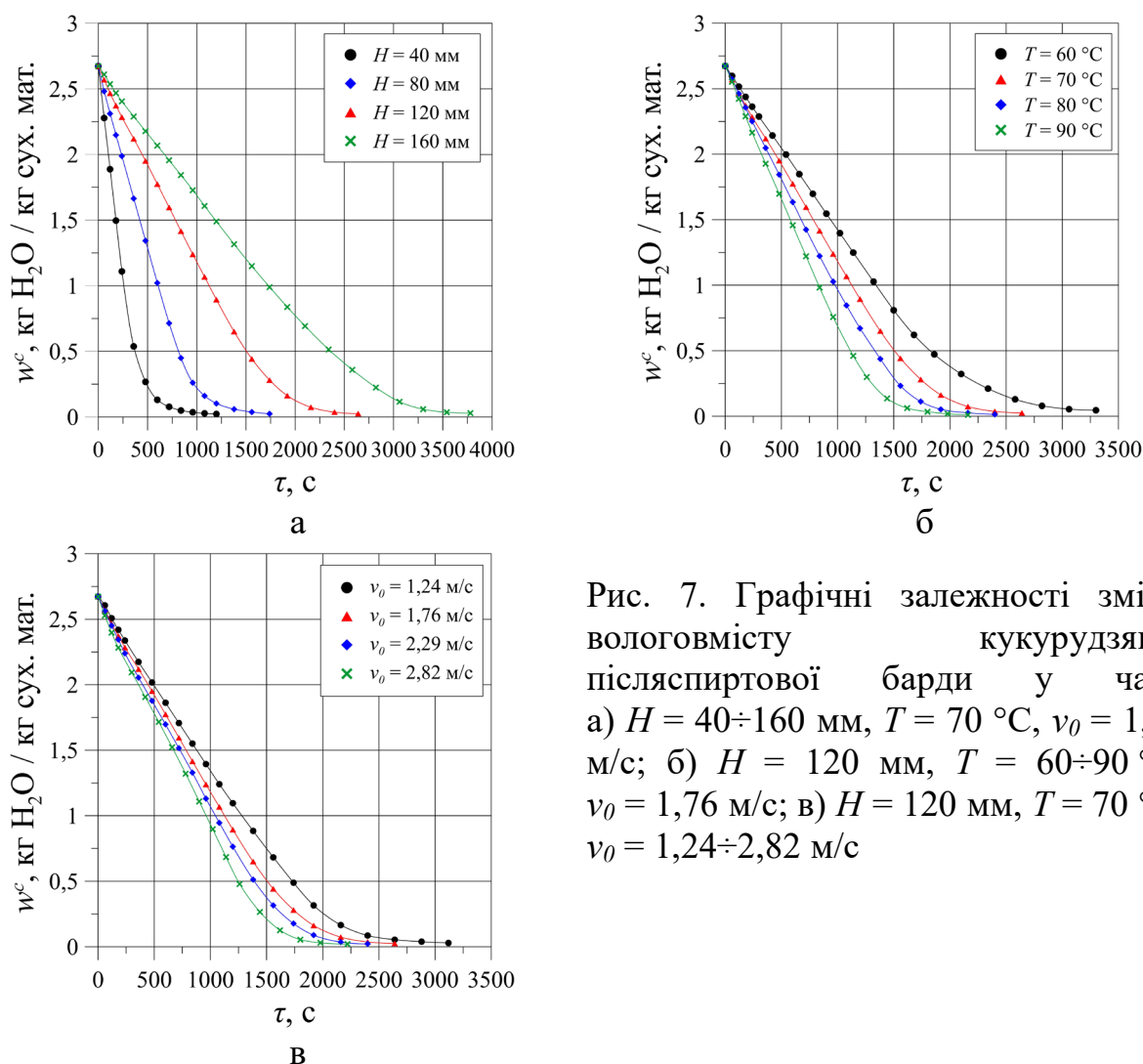


Рис. 7. Графічні залежності зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди у часі: а) $H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с; б) $H = 120$ мм, $T = 60 \div 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с; в) $H = 120$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,24 \div 2,82$ м/с

Аналіз графічних залежностей зміни вологовмісту у часі для дослідженої вторинної сировини рослинного походження свідчить про зменшення тривалості фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів із зменшенням висоти шару досліджуваного матеріалу (рис. 7, а), підвищенням температури теплового агента (рис. 7, б), зростанням швидкості теплового агента (рис. 7, в). Також

кінетичні криві фільтраційного сушіння свідчать про наявність двох періодів сушіння – періоду повного насичення теплового агенту вологою та часткового насичення теплового агенту вологою (рис. 7).

Для узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою використовуємо систему диференціальних рівнянь матеріального балансу вологи матеріалу та кінетики сушіння, яка є справедливою в межах $0 < \varphi < 1$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial H} = a \cdot (1 - \varphi) \\ -\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = n \cdot (1 - \varphi) \end{cases}, \quad (1)$$

де φ – відносна вологість повітря, у долях;

w^c – біжуче значення вологовмісту досліджуваного матеріалу, кг H_2O / кг сухого матеріалу;

a, n – кінетичні коефіцієнти, які залежать від структури матеріалу, $1/m, 1/c$ відповідно;

τ – час сушіння, с.

Згідно розв'язку системи рівнянь (1), кінетика фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою до досягнення критичного вологовмісту w_{cr} вологим матеріалом описується наступним рівнянням:

$$\frac{w^c}{w_0^c} = 1 - \eta \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (2)$$

де w_0^c – початкове значення вологовмісту матеріалу, кг H_2O / кг сухого матеріалу;

η – кінетичний коефіцієнт.

Так як у періоді повного насичення теплового агенту вологою зміна вологовмісту дисперсного матеріалу обмежується зовнішніми умовами сушіння, а саме швидкістю руху та температурою теплового агенту, то коефіцієнт η можна представити у загальному вигляді рівнянням:

$$\eta = A \cdot T^m \cdot v_0^n, \quad (3)$$

де A, m, n – константи для певного матеріалу, які визначаються на основі узагальнення результатів експериментальних досліджень за різних параметрів процесу сушіння.

Як наслідок, для періоду повного насичення теплового агенту вологою рівняння, що описує закономірності процесу сушіння (2) набуває вигляду:

$$w^c = w_0^c \cdot (1 - A \cdot T^m \cdot v_0^n \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}) \quad (4)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів рівняння (4) використовували графоаналітичний метод. Результати експериментальних досліджень кінетики (рис. 7) було виражено у координатах (рис. 8) $lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$, де w_e^c – рівноважне значення вологовмісту досліджуваного матеріалу, кг H_2O / кг сухого матеріалу. Було визначено періоди повного та часткового насичення теплового агенту вологою за допомогою апроксимації експериментальних даних прямими лініями (рис. 8). Точки перетину прямих і їх проекції на осі рисунків, дозволяють визначити логарифми критичного вологовмісту матеріалу $lg w_{cr}$ та

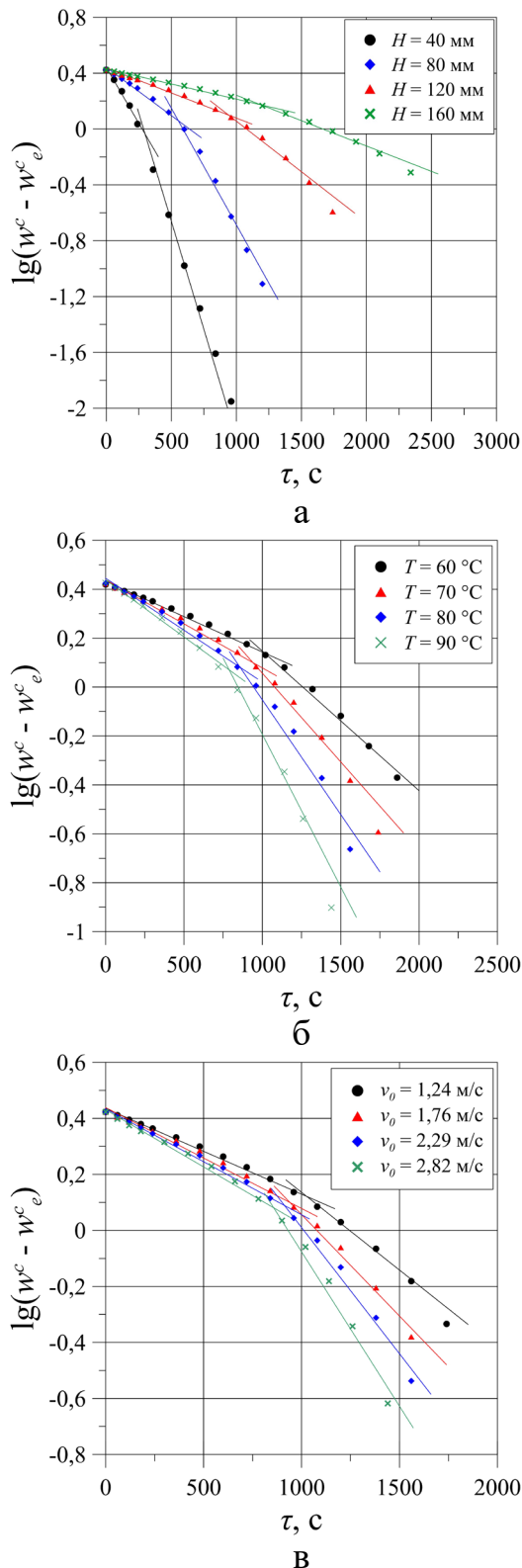


Рис. 8. Графічні залежності для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди: а) за різної висоти шару матеріалу H ; б) за різної температури теплового агента T ; в) за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

критичний час τ_{cr} досягнення зоною теплообміну перфорованої перегородки контейнера експериментальної установки, тобто, час сушіння у періоді повного насичення теплового агента вологою (рис. 8).

Розрахунок значень критичного вологовмісту w_{cr} досліджуваного матеріалу, тобто досягнення зоною теплообміну перфорованої перегородки контейнера експериментальної установки було виконано за допомогою рівняння:

$$w_{cr} = 10^x + w_e^c, \quad (5)$$

де $x = \lg(w^c - w_e^c)$ – ордината точки перетину двох прямих ліній на графічній залежності у координатах $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$.

Експериментальним шляхом було визначено значення рівноважного вологовмісту w_e^c для вторинної сировини рослинного походження, як найнижче досягнуте значення вологовмісту досліджуваного матеріалу під час процесу фільтраційного сушіння.

Аналіз одержаних даних свідчить про зростання значення критичного вологовмісту w_{cr} вторинної сировини рослинного походження із збільшенням висоти шару досліджуваного матеріалу, зменшенні температури теплового агента та швидкості його руху. Аналогічний вплив параметри фільтраційного сушіння мають на критичний час τ_{cr} .

Наступним кроком було визначення графоаналітичним методом значення кінетичних коефіцієнтів a та η за допомогою графічної залежності у системі координат $\ln((1 - w^c/w_0^c)/\tau) = f(H)$ (рис. 9).

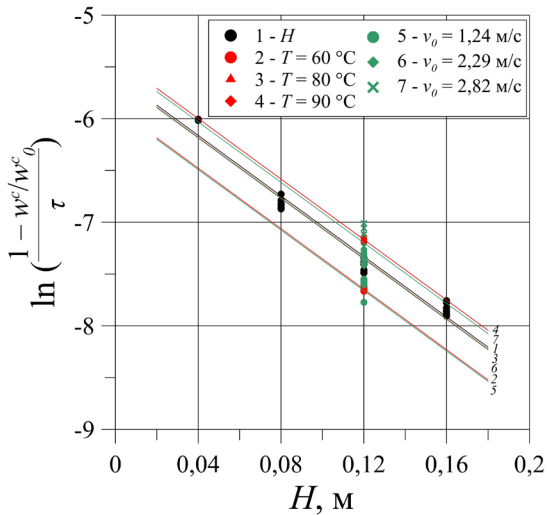


Рис. 9. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

Для побудови графічних залежностей використовували лише дані для періоду повного насичення теплового агента вологою, тобто до значень w_{cr} . Кінетичний коефіцієнт a визначали як тангенс кута нахилу прямих ліній, значення $\ln(\eta)$ відповідали точкам перетину прямих ліній з віссю ординат (рис. 9).

Додатково складали систему рівнянь для визначення констант A , m та n рівняння (3), що містила значення кінетичних коефіцієнтів η за різних параметрів процесу фільтраційного сушіння, так як зміна вологовмісту досліджуваного матеріалу у періоді повного насичення теплового агента вологою обмежується зовнішніми умовами процесу сушіння.

$$\begin{cases} \eta_1 = A \cdot T_1^m \cdot v_{01}^n \\ \eta_2 = A \cdot T_2^m \cdot v_{02}^n \\ \eta_3 = A \cdot T_3^m \cdot v_{03}^n \end{cases} \quad (6)$$

Систему рівнянь (6) виражали у логарифмічному вигляді та розв'язували матричним способом, отримували значення констант A , m та n для рівняння (4).

Визначені рівняння, що описують зміну вологовмісту досліджених матеріалів у часі у періоді повного насичення теплового агента вологою наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Рівняння, що описують зміну вологовмісту досліджених матеріалів у часі у періоді повного насичення теплового агента вологою

Дослідний матеріал	Розрахункові залежності
Кукурудзяна післяспиртова барда	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 2,086 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,645} \cdot v_0^{0,278} \cdot \tau \cdot e^{-14,606 \cdot H})$
Ячмінна пивна дробина	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 7,093 \cdot 10^{-7} \cdot T^{1,781} \cdot v_0^{0,765} \cdot \tau \cdot e^{-12,136 \cdot H})$
Відходи виробництва кави	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 9,37 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,368} \cdot v_0^{0,604} \cdot \tau \cdot e^{-11,641 \cdot H})$
Буряковий жом	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 6,159 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,61} \cdot v_0^{1,547} \cdot \tau \cdot e^{-12,753 \cdot H})$
Яблучні вичавки	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 1,237 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,06} \cdot v_0^{0,422} \cdot \tau \cdot e^{-10,075 \cdot H})$
Жолуді	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 4,423 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,029} \cdot v_0^{0,766} \cdot \tau \cdot e^{-13,941 \cdot H})$
Каштани	$w^c = w_0^c \cdot (1 - 6,001 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,987} \cdot v_0^{0,537} \cdot \tau \cdot e^{-13,127 \cdot H})$

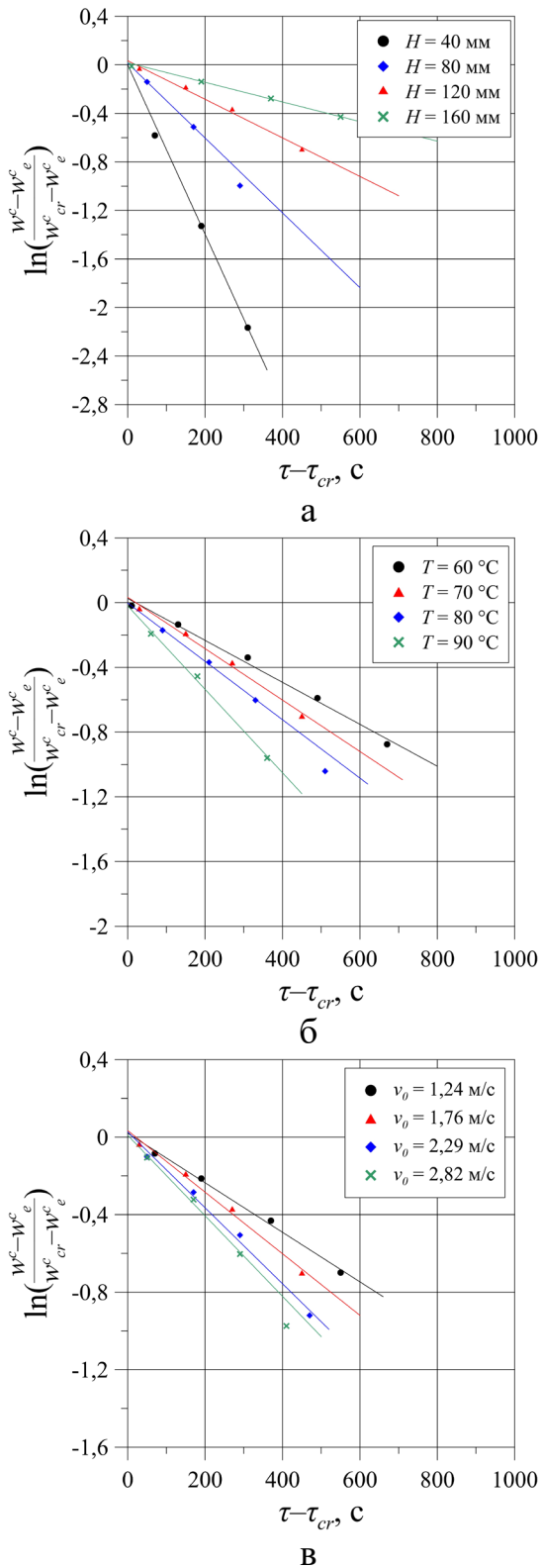


Рис. 10. Графічні залежності для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди: а) за різної висоти шару матеріалу H ; б) за різної температури теплового агента T ; в) за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Зміна вологовмісту у періоді часткового насичення теплового агента вологою визначається за рівнянням:

$$-\frac{dw^c}{d\tau} = K \cdot (w^c - w_e^c), \quad (7)$$

де K – коефіцієнт сушіння, 1/с, що у свою чергу виражається залежністю:

$$K = \chi \cdot N, \quad (8)$$

де χ – відносний коефіцієнт сушіння, кг сухого матеріалу/кг H_2O ;

N – швидкість сушіння у періоді повного насичення теплового агента вологою, кг H_2O / (кг сухого матеріалу · с):

$$N = \frac{w_0^c - w_{cr}^c}{\tau_{cr}} \quad (9)$$

Рівняння, що описує кінетичні закономірності у періоді часткового насичення теплового агента вологою (7) у кінцевому вигляді запишеться як:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (10)$$

Було виконано побудову графічних залежностей у системі координат $\ln((w^c - w_e^c)/(w_{cr}^c - w_e^c)) = f(\tau - \tau_{cr})$ для значень вологовмісту досліджуваних матеріалів у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$, де коефіцієнти швидкості сушіння K дорівнювали тангенсам кута нахилу одержаних прямих ліній (рис. 10).

За даними графічної залежності $K = f(N)$, визначали значення відносного коефіцієнта сушіння χ як тангенс кута нахилу одержаної усередненої прямої лінії, таким чином одержувавши дані для рівняння (10) (рис. 11).

Для оцінки коректності одержаних виразів зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння, було

побудовано графічні розподіли відхилень експериментальних даних та теоретично розрахованих значень (рис. 12).

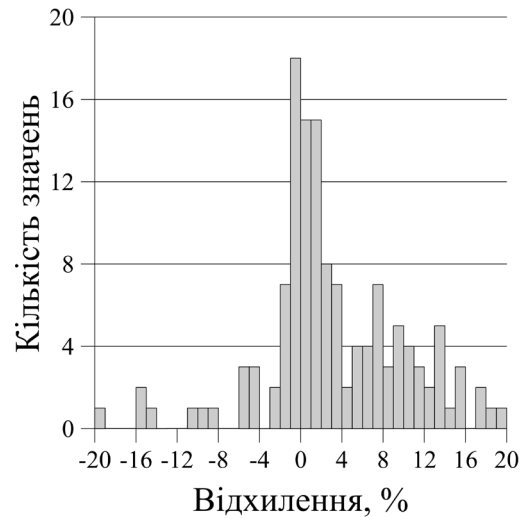
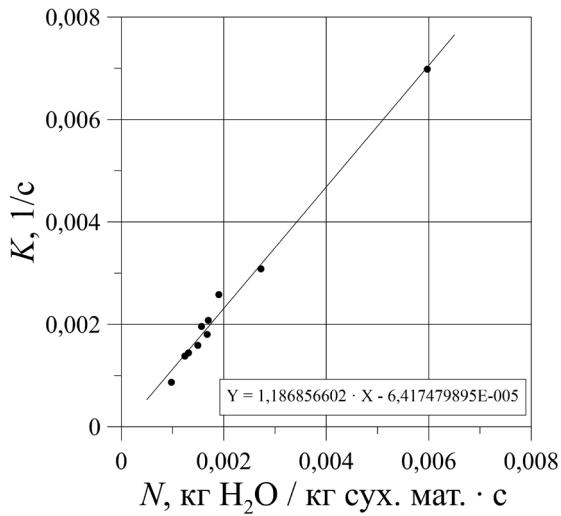


Рис. 11. Графічна залежність для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

Рис. 12. Графічна залежність розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння

Визначені рівняння, що описують зміну вологовмісту досліджених матеріалів у часі у періоді часткового насичення теплового агенту вологою наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Рівняння, що описують зміну вологовмісту досліджених матеріалів у часі у періоді часткового насичення теплового агенту вологою

Дослідний матеріал	Розрахункові залежності
Кукурудзяна післяспиртова барда	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-1,187 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$
Ячмінна пивна дробина	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-0,596 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$
Відходи виробництва кави	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-1,281 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$
Буряковий жом	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-0,303 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$
Яблучні вичавки	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-0,211 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$
Жолуді	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-4,535 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$
Каштани	$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-3,364 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c$

Усереднені значення відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміну вологовмісту у часі під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження наведено у табл. 6.

Таблиця 6. Середнє відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміну вологовмісту у часі під час фільтраційного сушіння

Дослідний матеріал	Відхилення, %
Кукурудзяна післяспиртова барда	5,37
Ячмінна пивна дробина	3,15
Відходи виробництва кави	5,83
Буряковий жом	8,46
Яблучні вичавки	7,6
Жолуді	4,94
Каштани	3,32

Для опису тривалості сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою визначаємо τ із рівняння (4), за умови, що $w^c_0 > w^c \geq w_{cr}$, $0 < \tau \leq \tau_{cr}$:

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w^c_0}}{A \cdot T^m \cdot v_0^n \cdot e^{-a \cdot H}}, \quad (11)$$

а для визначення часу сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою використовуємо вираз (10):

$$\tau_{II} = \frac{\chi \cdot (w^c_0 - w_{cr}) - \ln\left(\frac{w^c - w^c_e}{w_{cr} - w^c_e}\right)}{\chi \cdot N}. \quad (12)$$

Загальний час фільтраційного сушіння вологого матеріалу, що необхідний для сушіння від початкового вологовмісту до кінцевого становитиме суму значень рівнянь (11) та (12). Рекомендовано під час розрахунку часу фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою для значень вологовмісту $w^c_e < w^c < 0,5$ кг Н₂О / кг сухого матеріалу враховувати додаткові витрати теплоти на випаровування зв'язаної вологи та нагрівання вологого матеріалу за допомогою уточнюючого коефіцієнта $K\tau_{II} = 0,7 \div 0,9$, який зростає із зменшенням тангенсу нахилу кінетичної кривої сушіння:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \cdot K\tau_{II} \quad (13)$$

Для дослідження інтенсивності видалення вологи з вторинної сировини рослинного походження експериментальні результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння (рис. 7) зображали у вигляді залежностей зміни кількості випарованої вологи G у часі для досліджуваних параметрів процесу (рис. 13).

Аналіз рис. 13 свідчить, що для досліджених матеріалів висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом, що підтверджується паралельністю прямолінійних відрізків кривих інтенсивності сушіння (рис. 13, а). Таким чином, зроблено висновок про однаковий сушильний потенціал теплового агенту під час

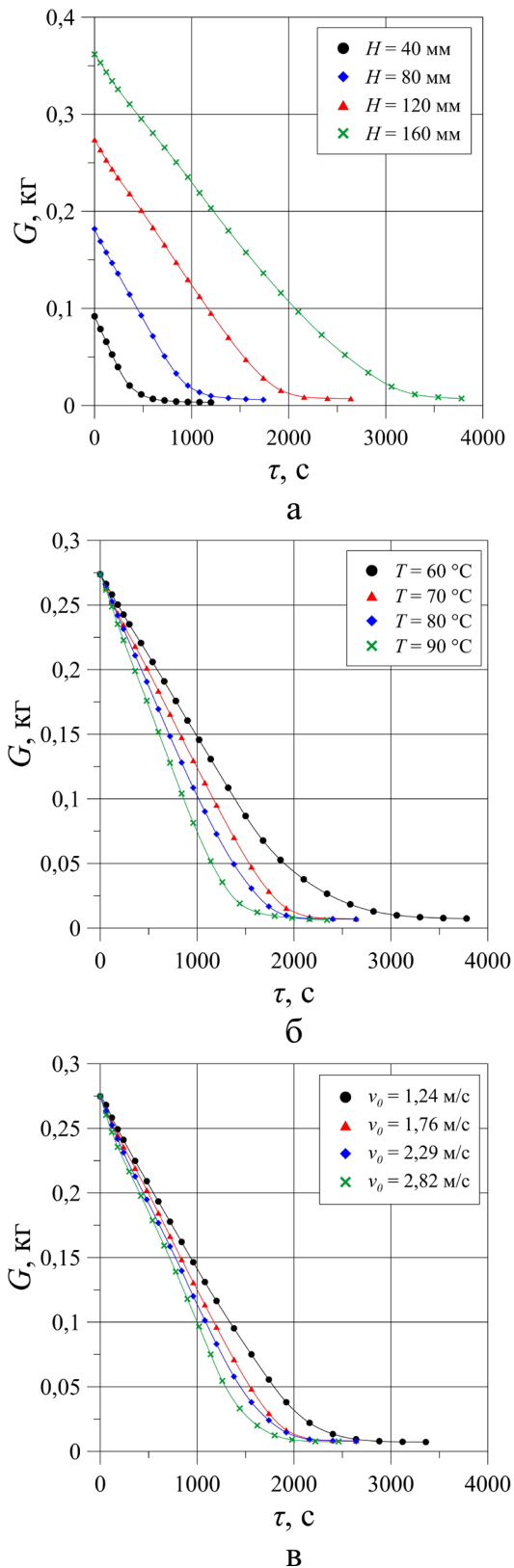


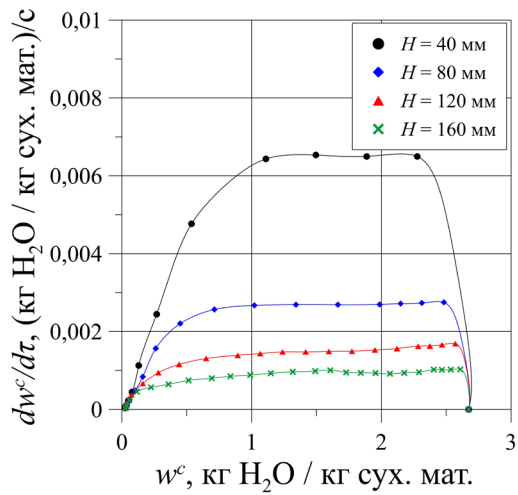
Рис. 13. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди: а) за різної висоти шару матеріалу H ; б) за різної температури теплового агента T ; в) за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

фільтраційного сушіння, що підтверджує існуючі уявлення про механізм процесу.

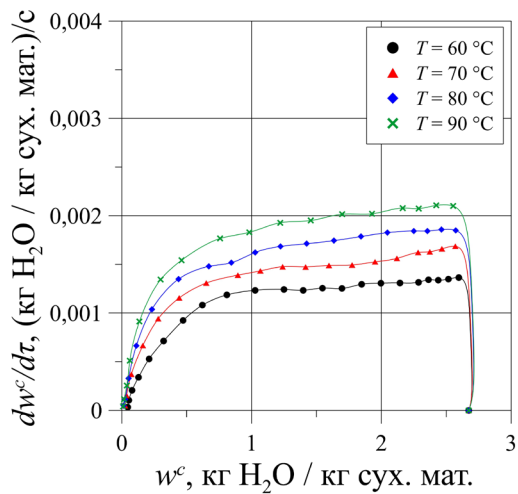
Інтенсивність видалення вологи під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження пропорційно зростає із збільшенням температури теплового агента (рис. 13, б) та підвищенням швидкості руху теплового агента (рис. 13, в). Зроблено висновок про те, що сушильний потенціал теплового агента для фільтраційного сушіння можливо збільшити за рахунок підвищення температури та швидкості руху теплового агента.

Було побудовано графіки залежності швидкості фільтраційного сушіння від зміни вологовмісту матеріалу, які важливі для оцінки характеру зв'язку вологи з матеріалом та прогнозування енергетичних витрат (рис. 14). Аналіз графічних залежностей показує, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням висоти шару вологого матеріалу (рис. 14, а), підвищенням температури теплового агента (рис. 14, б) та збільшенням швидкості руху теплового агента (рис. 14, в). Вплив температури пояснюється зростанням сушильного потенціалу теплового агента із її збільшенням, а вплив швидкості руху теплового агента пояснюється збільшенням його об'ємної витрати та, відповідно, кількості вологи, що видалається з шару за одиницю часу, а також збільшенням коефіцієнтів тепломасовіддачі.

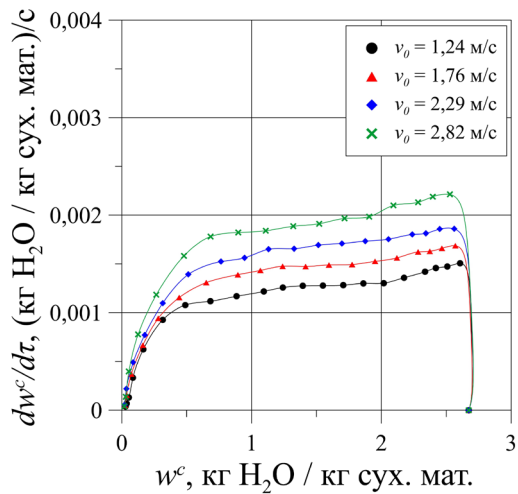
Для підтвердження одержаних висновків було побудовано залежності зміни вологовмісту теплового агента від часу на основі отриманих результатів (рис. 15).



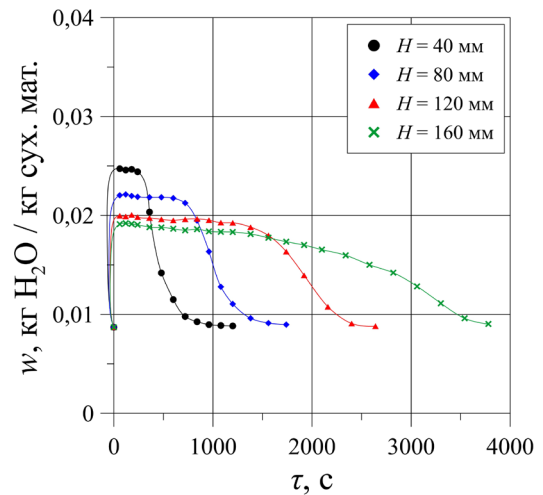
а



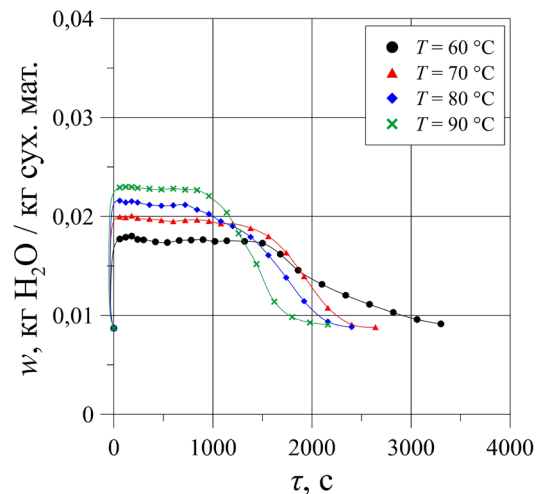
б



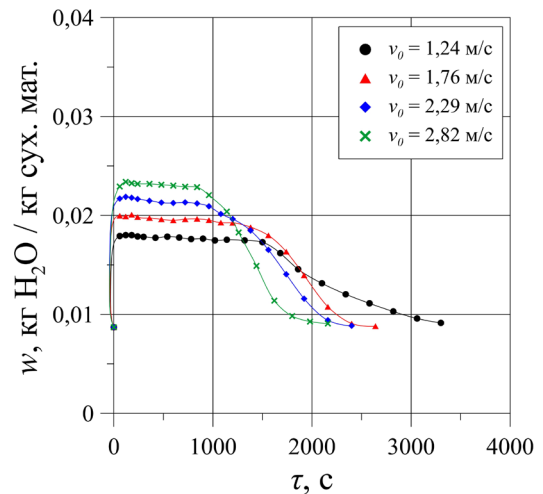
в



а



б



в

Рис. 14. Швидкість фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди: а) за різної висоти шару матеріалу H ; б) за різної температури теплового агента T ; в) за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Рис. 15. Зміна вологовмісту теплового агента під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди: а) за різної висоти шару матеріалу H ; б) за різної температури теплового агента T ; в) за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Аналіз рис. 15 свідчить про те, що насичення теплового агенту вологою з часом зменшується. Цей факт вказує на наявність двох періодів сушіння: повного та часткового насичення теплового агенту вологою. Перехід між періодами сушіння можна чітко прослідкувати на графічних залежностях (рис. 15).

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень визначення основних тепломасообмінних коефіцієнтів для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження – коефіцієнтів теплообміну, масообміну та дифузії.

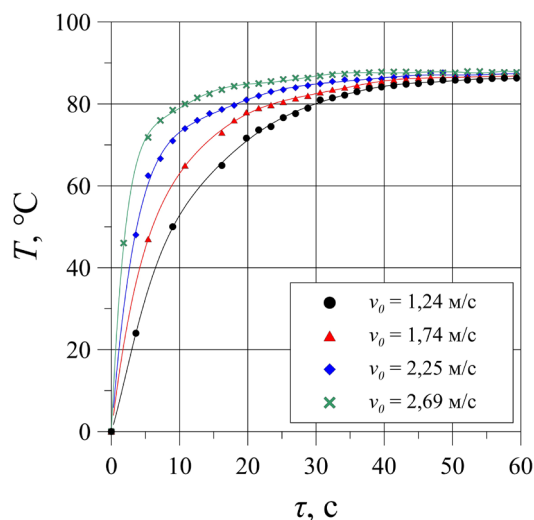


Рис. 16. Зміна температури теплового агенту на виході з сухого шару кукурудзяної післяспиртової барди

ту на виході із шару досліджуваних сухих матеріалів, приклад наведено на рис. 16.

На основі одержаних експериментальних значень (рис. 16) розраховували значення коефіцієнтів тепловіддачі α згідно з рівнянням тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (t - T_{п.}) \cdot \Delta \tau} \quad (14)$$

де ΔQ – кількість переданої теплоти, кДж;

t – середньоарифметична температура теплового агенту на вході і виході з шару згідно із замірами, °С;

$T_{п.}$ – середня температура поверхні твердих частинок, °С.

Кількість теплоти ΔQ розраховували за рівнянням теплового балансу для теплового агенту, t приймалося як середньоарифметична температура теплового агенту на вході і виході з шару згідно проведених вимірювань. Середня температура поверхні твердих частинок $T_{п.}$ оцінювалась наступним чином. З рівнянь теплового балансу визначалась середня температура частинок T :

$$\Delta Q = m_{t.a.} \cdot c_{t.a.} \cdot (t - T_0^*) \quad (15)$$

де $m_{t.a.}$ – маса теплового агенту, кг;

$c_{t.a.}$ – питома теплоємність теплового агенту, кДж/кг·°С;

T_0^* – початкова температура поверхні твердих частинок, °С.

Фільтраційне сушіння носить зональний характер і у шарі матеріалу одночасно знаходяться сухий та вологий матеріал, тому треба визначати коефіцієнти теплообміну і для вологого, і для сухого матеріалу. Із семи досліджених у роботі матеріалів для прикладу наведено один.

Для визначення усереднених коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до шару сухого матеріалу, тепловий агент фільтрували із заданою швидкістю і температурою. Були зафіксовані значення температури теплового аген-

Для оцінки температури поверхні використовували аналітичні моделі, розроблені для частинок, наближених за формою до кулястої. Для спрощення розрахунків припускали, що тепловий агент нагріває частинку однорідно з усіх сторін. Розподіл температури всередині частинки описується параболічною залежністю, тобто температура поступово зростає від поверхні до центру. Температуру поверхні визначали за допомогою рівняння:

$$T_{\text{п.}} = t - (t - T_0^* \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo}) \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo} \quad (16)$$

де R , r – радіус частинки і біжучий радіус відповідно ($0 < r \leq R$), м;
 μ_1 – корінь характеристичного рівняння;
 Fo – критерій Фур'є.

Зважаючи на складну просторову геометрію – криволінійну форму каналів між частинками та їхню змінну площу поперечного перерізу, швидкість теплового агента відносно поверхні частинок є неоднорідною. Це спричиняє багаторазові зміни локальних коефіцієнтів тепловіддачі, внаслідок чого отримані значення є усередненими по всьому шару матеріалу. Коефіцієнти тепловіддачі α для сухого шару досліджених матеріалів розраховано за рівнянням (14) і представлено на рис. 17.

Отримані експериментальні результати демонструють лінійну кореляцію між коефіцієнтом тепловіддачі та дійсною швидкістю фільтрування теплового агента (рис. 17). Спостерігаємо залежність посилення інтенсивності процесу теплообміну – ріст коефіцієнта тепловіддачі α із збільшенням дійсної швидкості руху теплового агента (рис. 17).

Таким чином, за однакової дійсної швидкості через канали між частинками більшого розміру профільтровується більша кількість теплового агента і в шар вноситься більша кількість теплоти.

Узагальнення експериментальних результатів, наведених на рис. 17, проводили за рівнянням:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m, \quad (17)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – критерій Нусельта;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

A , n – коефіцієнти, що визначаються експериментальним шляхом.

Під час узагальнення результатів дослідження гідродинаміки за основний лінійний розмір нами прийнято еквівалентний діаметр d_e каналів, крізь які фільтрується тепловий агент. Враховуючи, те, що фізичні параметри повітря змінювалися у вузькому діапазоні, приймали $Nu \sim Pr^{0,33}$.

Для визначення невідомих коефіцієнтів A та n експериментальні значення представлялись залежністю $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ у логарифмічній системі координат. На рис. 18 представлена вищезгадана залежність для сухих досліджених матеріалів.

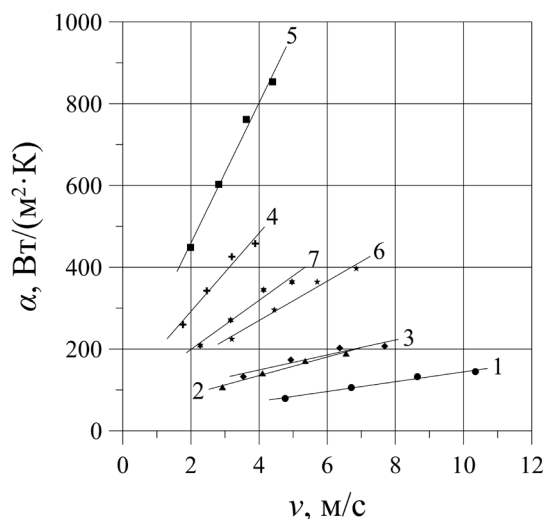


Рис. 17. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості руху теплового агента для сухого шару досліджених матеріалів: 1) післяспиртова барда; 2) пивна дробина; 3) відходи виробництва кави; 4) яблучні вичавки; 5) буряковий жом; 6) жолуді; 7) каштани

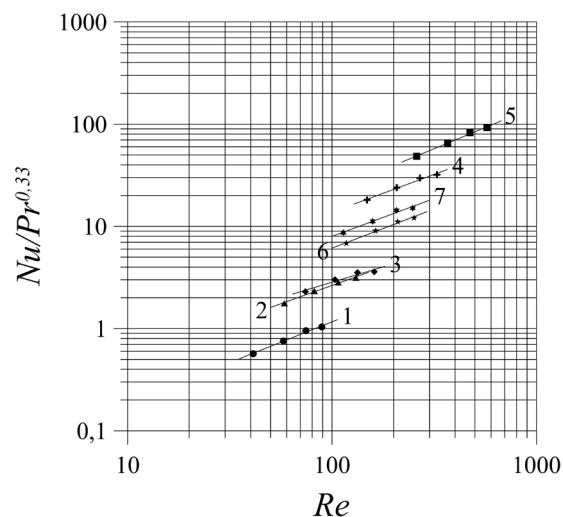


Рис. 18. Узагальнення результатів експериментального дослідження теплообміну у сухому шарі матеріалів: 1) післяспиртова барда; 2) пивна дробина; 3) відходи виробництва кави; 4) яблучні вичавки; 5) буряковий жом; 6) жолуді; 7) каштани

Визначені коефіцієнти A та n рівняння (17) для сухого шару вторинної сировини рослинного походження наведено у табл. 7.

Таблиця 7. Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (17) для сухого шару матеріалів вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Re	A	n	m
Кукурудзяна післяспиртова барда	41÷90	0,03	0,798	0,33
Ячмінна пивна дробина	58÷132	0,098	0,716	
Відходи виробництва кави	74÷161	0,18	0,6	
Яблучні вичавки	148÷327	0,454	0,741	
Буряковий жом	259÷574	0,486	0,83	
Жолуді	117÷253	0,18	0,766	
Каштани	113÷279	0,261	0,743	

Коефіцієнт тепловіддачі для вологого шару матеріалу під час фільтраційного сушіння визначали із кінетичного рівняння:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot r = \alpha \cdot F \cdot \left(\frac{t_{\text{вх.}} + t_{\text{вих.}}}{2} - t_{\text{м.т.}} \right), \quad (18)$$

де ΔW – маса випареної води за певний проміжок часу, кг;

F – ефективна поверхня тепло- і масообміну, м^2 ;

$t_{\text{вх.}}$, $t_{\text{вих.}}$, $t_{\text{м.т.}}$ – відповідно, температура теплового агента на вході у шар матеріалу, на виході із шару матеріалу, температура мокрого термометра, $^{\circ}\text{C}$.

Коефіцієнти тепловіддачі α для вологого шару досліджених матеріалів було розраховано за рівнянням (18) і представлено на рис. 19.

Із графічних залежностей (рис. 19) очевидно, що підвищення швидкості призводить до інтенсифікації процесу теплообміну, оскільки значення коефіцієнтів тепловіддачі α теж зростають.

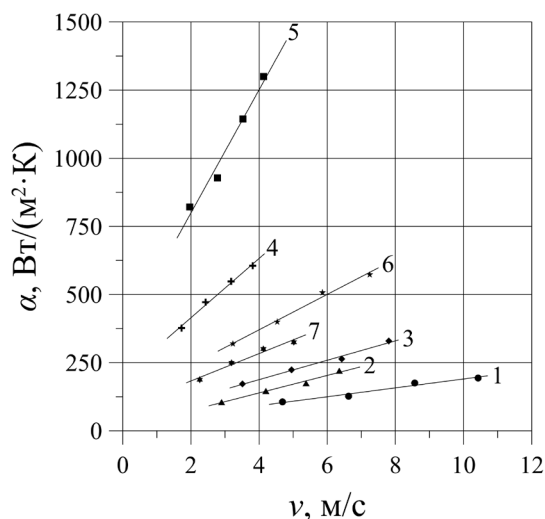


Рис. 19. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості руху теплового агенту для вологого шару: 1) післяспиртова барда; 2) пивна дробина; 3) відходи виробництва кави; 4) яблучні вичавки; 5) буряковий жом; 6) жолуді; 7) каштани

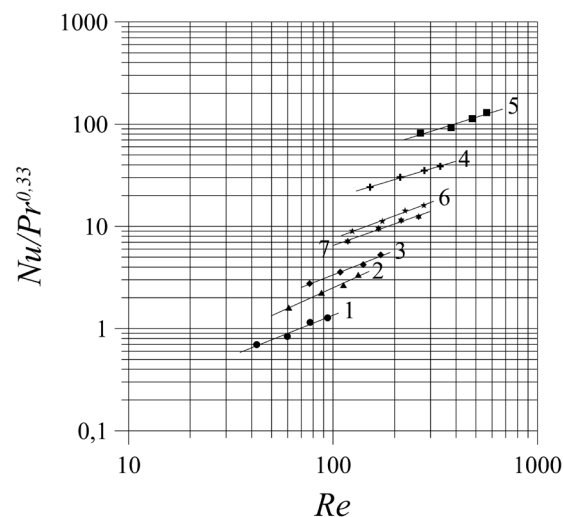


Рис. 20. Узагальнення результатів експериментального дослідження теплообміну у вологому шарі: 1) післяспиртова барда; 2) пивна дробина; 3) відходи виробництва кави; 4) яблучні вичавки; 5) буряковий жом; 6) жолуді; 7) каштани

Узагальнення експериментальних результатів, наведених на рис. 19, проводили за рівнянням (17). Для визначення невідомих коефіцієнтів A та n експериментальні значення, аналогічно як і для сухого шару досліджуваних матеріалів, представлялись залежністю $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ у логарифмічній системі координат (рис. 20). Визначені коефіцієнти A та n рівняння (17) для вологого шару вторинної сировини рослинного походження на основі рис. 20 наведено у табл. 8.

Таблиця 8. Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (17) для вологого шару матеріалів вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Re	A	n	m
Кукурудзяна післяспиртова барда	41÷90	0,034	0,8	0,33
Ячмінна пивна дробина	58÷132	0,038	0,907	
Відходи виробництва кави	74÷161	0,09	0,786	
Яблучні вичавки	148÷327	1,217	0,597	
Буряковий жом	259÷574	2,432	0,623	
Жолуді	117÷253	0,246	0,744	
Каштани	113÷279	0,259	0,7	

Коефіцієнт масовіддачі β визначали із кінетичного рівняння:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta \cdot F \cdot \left(d_{\text{нас.}} - \frac{d_{\text{нас.}} + d_1}{2} \right) \cdot \rho, \quad (19)$$

де $d_{\text{нас.}}$, d_1 – відповідно, вологовміст теплового агента в стані насичення та початковий, кг $\text{H}_2\text{O}/\text{кг}$ сух. повітря.

Розраховані значення коефіцієнтів масовіддачі β для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження представляли як залежність від дійсної швидкості руху теплового агента v крізь шар матеріалів (рис. 21).

Для узагальнення отриманих результатів одержані коефіцієнти масовіддачі β виражали як безрозмірні комплекси Sh , Sc залежно від числа Re :

$$Sh = A \cdot Re^n \cdot Sc^m, \quad (20)$$

де $Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D}$ – критерій Шервуда;

$Sc = \frac{\nu}{D}$ – критерій Шмідта;

D – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітря.

Враховуючи, те, що фізичні параметри повітря змінювалися у вузькому діапазоні, приймали $Sh \sim Sc^{0,33}$. Значення коефіцієнтів A , n рівняння (20) визначали із графічної залежності $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$, що була побудована на основі експериментальних даних (рис. 22). Визначені коефіцієнти A , n та m рівняння (20) для вологого шару вторинної сировини рослинного походження на основі рис. 22 наведено у табл. 9. Максимальне відносне відхилення між експериментальними та розрахованими за рівняннями (17) та (20) значеннями не перевищує 7,5 %.

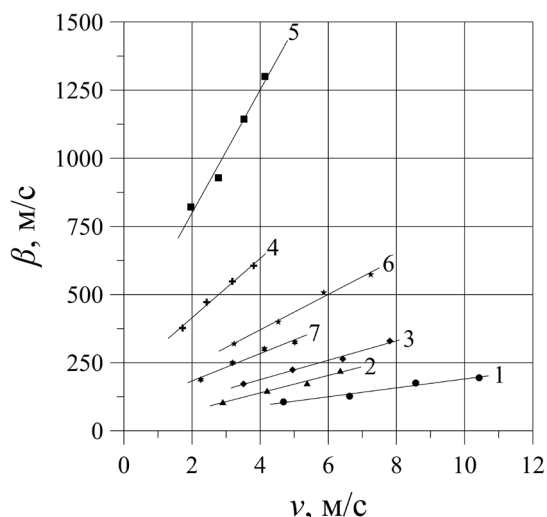


Рис. 21. Залежність коефіцієнту масовіддачі β від дійсної швидкості руху теплового агента для вологого шару: 1) післяспиртова барда; 2) пивна дробина; 3) відходи виробництва кави; 4) яблучні вичавки; 5) буряковий жом; 6) жолуді; 7) каштани

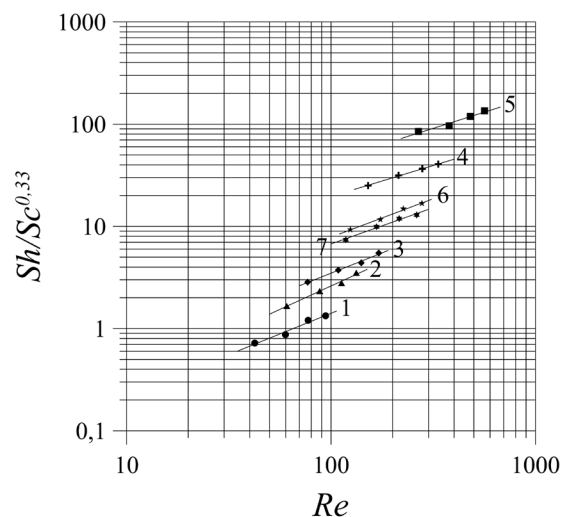


Рис. 22. Узагальнення результатів експериментального дослідження масообміну у вологому шарі: 1) післяспиртова барда; 2) пивна дробина; 3) відходи виробництва кави; 4) яблучні вичавки; 5) буряковий жом; 6) жолуді; 7) каштани

Таблиця 9. Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (20) для вологого шару матеріалів вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Re	A	n	m
Кукурудзяна післяспиртова барда	41÷90	0,034	0,809	0,33
Ячмінна пивна дробина	58÷132	0,038	0,916	
Відходи виробництва кави	74÷161	0,09	0,795	
Яблучні вичавки	148÷327	1,208	0,605	
Буряковий жом	259÷574	2,391	0,632	
Жолуді	117÷253	0,244	0,753	
Каштани	113÷279	0,257	0,709	

У періоді повного насичення теплового агента вологою тепловий агент передає тепло поверхні матеріалу і, відповідно, волога з поверхні випаровується та переноситься у тепловий агент. Обидва процеси є конвективними і залежать від гідродинаміки – інтенсивності руху теплового агента, що характеризується числом Рейнольдса. Незважаючи на різну природу тепло- і масообмінних процесів, вони описуються подібними математичними моделями (17) і (20) – аналіз експериментальних даних свідчить про подібність критеріальних залежностей для коефіцієнтів тепловіддачі та масовіддачі, що вказує на ідентичний характер впливу гідродинаміки на ці процеси.

Для узагальнення подібності тепло- та масообміну представлено на спільному графіку комплекси $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ та $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$ (рис. 23). Аналіз рис. 23 свідчить про ідентичність визначених комплексів для процесів тепло- та масообміну.

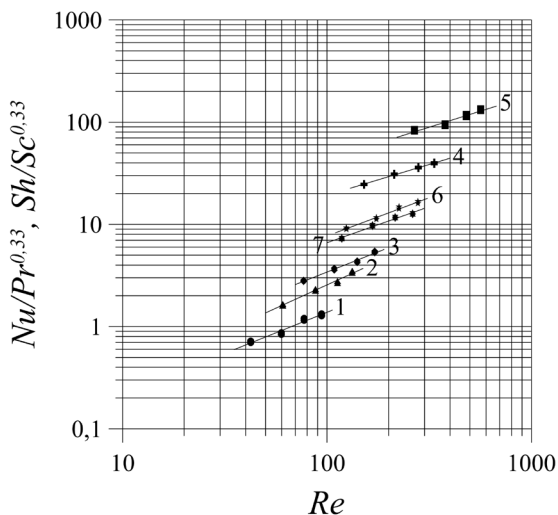


Рис. 23. Узагальнення подібності тепло- та масообміну у періоді повного насичення теплового агента вологою

Для узагальнення визначеної подібності тепло- та масообмінних процесів, утотожнимо отримані комплекси:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = \frac{Sh}{Sc^{0,33}} \quad (21)$$

Підставивши складові у рівняння (21), отримуємо вираз:

$$\frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33}} = \frac{\beta \cdot d_e}{D \cdot \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0,33}} \quad (22)$$

Виконавши математичні перетворення рівняння (22), приходимо до рівняння:

$$\frac{\alpha}{c \cdot \rho} = \beta \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{0,67} \quad (23)$$

Звідки отримуємо загальну залежність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі:

$$\beta = \frac{\alpha}{c \cdot \rho \cdot Le^{0,67}} \quad (24)$$

де $Le = \frac{a}{D}$ – число Л'юїса.

Зважаючи на те, що для частинок різної форми застосовуються різні теорії визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії, було проведено класифікацію досліджуваних матеріалів вторинної сировини рослинного походження: серед об'єктів досліджень присутні частинки кулястої форми (кукурудзяна післяспиртова барда, відходи виробництва кави, жолуді дубу звичайного), циліндричної форми (ячмінна пивна дробина, буряковий жом) та призматичні (яблучні вичавки, плоди гіркокаштану звичайного). Для аналізу процесу внутрішньодифузійного масоперенесення, що відбувається всередині частинок різної форми, коефіцієнт внутрішньої дифузії визначали на основі математичного розв'язку диференціального рівняння дифузійного перенесення, за граничних умов першого роду. Для прикладу показано визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії для частинок кулястої форми.

Для частинок кулястої форми рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} \right), \quad (25)$$

де D_w – коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с.

Для визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії необхідно отримати математичний розв'язок диференційного рівняння внутрішньої дифузії – другого закону Фіка. Враховуючи те, що тепловий агент вільно обдуває частинку, можемо допустити у першому наближенні, що дифузійні числа Bi є великими, а саму задачу можна звести до граничних умов першого роду.

Рівняння (25) необхідно доповнити крайовими умовами:

$$\begin{cases} w^c(r, \tau = 0) = w_0^c, w^c(r = R, \tau) = w_e^c, \\ \left(\frac{\partial w^c}{\partial r} \right)_{r=0, \tau} = 0 \end{cases}, \quad (26)$$

де r, R – біжучий радіус і радіус частинки, м;

w^c, w_e^c, w_0^c – біжучий, рівноважний та початковий вологовміст одинарної частинки, кг Н₂О /кг сух. мат.

Якщо допустити, що всі частинки кулястої форми, рівномірно обдуваються потоком теплового агенту, волога у них рівномірно розподілена у порах і вологовміст теплового агенту рівний вологовмісту на поверхні частинки, то розв'язок системи (25) – (26) буде представлений у вигляді:

$$\frac{w^c - w_e}{w_0^c - w_e} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D_w \cdot \tau}{R^2}}, \quad (27)$$

де $B_n = 6/\mu_n^2$;

μ_n – корені характеристичного рівняння.

За великих чисел критерію Фур'є Fo та великих значень часу τ членами суми $n > 1$ можна знехтувати, а розв'язок (27) з першим членом після логарифмування набуде кінцевого вигляду:

$$-\ln \left(\frac{w^c - w_e^c}{w_0^c - w_e^c} \right) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \pi^2 \cdot \frac{D_w \cdot \tau}{R^2}, \quad (28)$$

Коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w можна визначити із графічної залежності $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від τ через тангенс кута нахилу прямих до осі абсцис (рис. 24):

$$D_w = \frac{tg\alpha \cdot R^2}{\pi^2}. \quad (29)$$

На рис. 25 наведено графічну залежність визначених значень коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури.

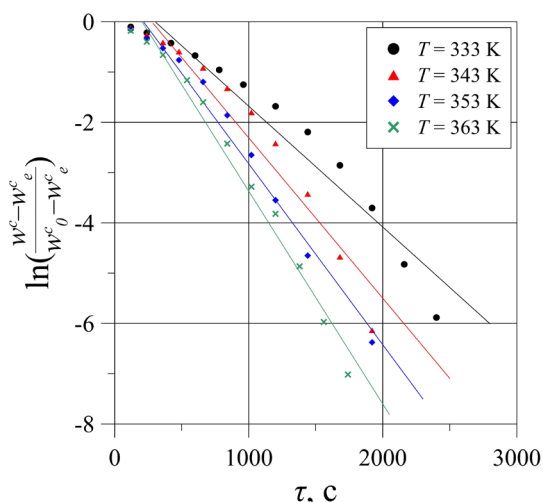


Рис. 24. Графічна залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від часу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

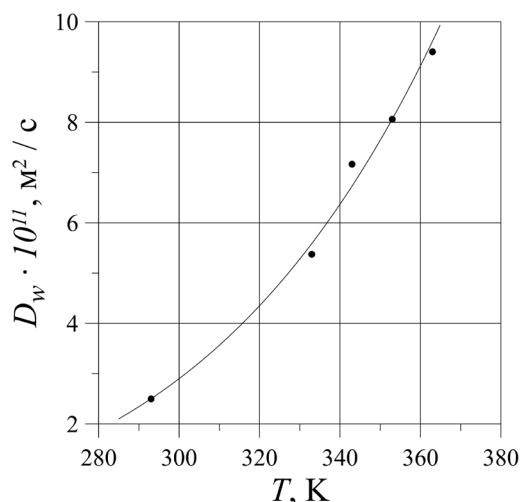


Рис. 25. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для кукурудзяної післяспиртової барди

Аналіз рис. 25 вказує на зростання коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w вологи з частинок вторинної сировини рослинного походження із підвищенням температури теплового агенту. Дані залежності виражали за допомогою критеріальних рівнянь для усіх досліджених матеріалів (табл. 10).

Для перевірки адекватності залежностей було визначено відношення експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії до теоретично розрахованих (табл. 10).

Таблиця 10. Рівняння для визначення коефіцієнту внутрішньої дифузії вторинної сировини рослинного походження та усереднені відхилення розрахункових значень від експериментально одержаних

Дослідний матеріал	Розрахункові залежності	Відхилення, %
Кукурудзяна післяспиртова барда	$D_w^t = D_w^{293} + 8,2 \cdot 10^{-14} \cdot (T - 293)^{1,6}$	3,3
Ячмінна пивна дробина	$D_w^t = D_w^{293} + 1,8 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)^{1,8}$	1,76
Відходи виробництва кави	$D_w^t = D_w^{293} + 10,2 \cdot 10^{-14} \cdot (T - 293)^2$	3,35
Буряковий жом	$D_w^t = D_w^{293} + 6,3 \cdot 10^{-17} \cdot (T - 293)^{1,2}$	2,67
Яблучні вичавки	$D_w^t = D_w^{293} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot (T - 293)^2$	3,87
Жолуді	$D_w^t = D_w^{293} + 4 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)$	5,75
Каштани	$D_w^t = D_w^{293} + 1,8 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)^{1,8}$	2,14

У шостому розділі представлено результати експериментальних досліджень основних енергетичних характеристик вторинної сировини рослинного походження. Тверде паливо повинно володіти рядом характеристик, що визначають його властивості. До таких властивостей належать насамперед теплотворна здатність, зольність та залишкова вологість. У країнах Європи та світу існують різні стандарти, які регламентують вимоги до твердого палива. Дотримання наявних стандартизованих вимог до твердого палива регулює ефективність та безпечність його використання. Наприклад, відповідно до німецького стандарту DIN 51731, тверде паливо має відповідати наступним параметрам: вміст води (<12 %), вміст золи (<1,5 %), теплотворна здатність (3705÷4661 ккал/кг).

Результати експериментальних досліджень неформованої осушеної вторинної сировини рослинного походження наведено у табл. 11. Досліджені матеріали порівнювали із характеристиками швидкоростучих трав та відходами сільськогосподарських культур, що набули в Україні поширення для виготовлення твердого палива та існуючими європейськими стандартами (табл. 11).

Аналіз одержаних експериментальних даних засвідчив перспективність проведення подальших досліджень, з огляду на те, що зольність досліджених матеріалів знаходиться в межах зольності існуючих аналогів, а отримані значення вищої теплотворної здатності перевищують або приблизно рівні значенням для існуючих аналогів (табл. 11). Дані результати вказують на теоретично вищу ефективність сформованого твердого палива та перспективність подальших досліджень по виготовленню дослідних зразків.

Таблиця 11. Основні енергетичні характеристики вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Теплотворна здатність, кДж/кг	Зольність, % мас.	Вологість, % мас.
Кукурудзяна післяспиртова барда	≈ 19545	≈ 2,1	≈ 3
Ячмінна пивна дробина	≈ 20005	≈ 1,9	≈ 6,5
Відходи виробництва кави	≈ 21583	< 1	≈ 5,5
Буряковий жом	≈ 15900	≈ 4,3	≈ 9,8
Яблучні вичавки	≈ 18592	≈ 0,8	≈ 9,9
Жолуді	≈ 18163	≈ 0,9	≈ 4,5
Каштани	≈ 17549	≈ 1,3	≈ 6,8
Енергетична верба	≈ 17600	< 2	< 7
Міскантус	≈ 17500	< 4,5	< 7,5
Стебла соняшника	≈ 18000	≈ 4,3	6÷12
Стандарт DIN 51731	> 15512	< 1	< 12
Стандарт SS 187120	> 16910	< 1,5	< 10

З огляду на позитивні результати дослідження основних теплотворних характеристик несформованої вторинної сировини рослинного походження, було виготовлено брикетовані зразки альтернативного твердого палива з досліджених матеріалів (рис. 26).



Рис. 26. Дослідний брикетований зразок твердого палива з кукурудзяної післяспиртової барди

Осушену вторинну сировину рослинного походження піддавали пресуванню у гідравлічному пресі марки П474А за тиску 100 кгс/см^2 та температури у прес-формі $150 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 60 с. Додаткові в'язучі речовини для формування брикетованих взірців не використовували. Як результат проведених досліджень було отримано дослідні брикетовані зразки твердого палива, які володіють міцністю та сталою формою. Приклад брикетованого зразка наведено на рис. 26.

Результати експериментальних досліджень брикетованих зразків альтернативного твердого палива з осушеної вторинної сировини рослинного походження наведено у табл. 12.

Таблиця 12. Основні енергетичні характеристики брикетованих зразків альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Теплотворна здатність, кДж/кг	Зольність, % мас.	Вологість, % мас.
Кукурудзяна післяспиртова барда	≈ 22445	$\approx 0,9$	< 1
Ячмінна пивна дробина	≈ 20173	$\approx 1,5$	$< 1,5$
Відходи виробництва кави	≈ 22147	≈ 1	< 1
Буряковий жом	≈ 16318	$\approx 4,8$	< 1
Яблучні вичавки	≈ 19438	$\approx 0,5$	< 1
Жолуді	≈ 17428	$\approx 1,2$	< 1
Каштани	≈ 18835	$\approx 1,3$	< 1

При порівнянні експериментальних даних з табл. 11 та табл. 12 спостерігаємо, що вища теплотворна здатність брикетованого твердого палива є більшою за значення несформованої досліджуваної сировини – найімовірніше за рахунок додаткової втрати вологи під час пресування за підвищеної температури, а також збільшення щільності та густини одержаного брикету. Що стосується значень зольності одержаних брикетованих зразків, то закономірностей із зміною часу пресування та їх теплотворною здатністю не спостерігається.

Отримані дослідні брикетовані зразки твердого палива зберігалися на відкритому повітрі протягом декількох місяців для дослідження збереження механічних властивостей при зберіганні. У жодному дослідженому зразку видимих змін не спостерігалось.

Аналіз табл. 11, 12 свідчить, що визначені теплофізичні характеристики виготовлених брикетованих зрізів відповідають існуючим вимогам європейських стандартів до твердого палива.



Рис. 27. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з кукурудзяної післяспиртової барди

Іншою поширеною формою використання твердого палива є гранули. Осушену вторинну сировину рослинного походження піддавали гранулюванню у грануляторі марки Pelletnik-150 з метою одержання дослідних зразків твердопаливних гранул. Вологість вихідної сировини становила $\omega = 14$ % мас. згідно рекомендацій виробника гранулятора. Розмір отворів матриці гранулятора становив 0,006 м. Приклад гранульованих зразків наведено на рис. 27.

Результати експериментальних досліджень гранульованих зразків

альтернативного твердого палива з осушеної вторинної сировини рослинного походження наведено у табл. 13.

Аналіз результатів, наведених у табл. 11, 13 також вказує на те, що основні теплотворні характеристики гранульованих зразків альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження відповідають вимогам існуючих стандартів та рослинних аналогів, що широко використовуються в Україні як тверде паливо.

Таблиця 13. Основні енергетичні характеристики гранульованих зразків альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Теплотворна здатність, кДж/кг	Зольність, % мас.	Вологість, % мас.
Кукурудзяна післяспиртова барда	≈ 20429	≈ 1	$\approx 8,3$
Ячмінна пивна дробина	≈ 19033	$\approx 4,6$	$\approx 9,2$
Відходи виробництва кави	≈ 23190	$\approx 1,6$	$\approx 8,9$
Буряковий жом	≈ 15481	$\approx 5,2$	$\approx 8,6$
Яблучні вичавки	≈ 18466	$\approx 1,1$	$\approx 8,6$
Жолуді	≈ 16777	$\approx 1,6$	$\approx 9,4$
Каштани	≈ 17526	$\approx 3,4$	$\approx 9,3$

З огляду на це, можемо стверджувати про перспективність виготовлення та використання альтернативного твердого палива із досліджених матеріалів, до переваг якого відноситься зокрема: наявність значної сировинної бази, висока теплотворна здатність, низька зольність, екологічність, формування паливних зразків без допомоги в'язучих речовин.

У **сьомому розділі** наведено результати розрахунку технологічно доцільних параметрів процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі експериментальних даних та одержаних залежностей у розділах 3 та 4. Розрахунок виконували, виходячи із міркувань, що енергія для процесу осушення Q^{lab} , в основному, витрачається на нагрів теплового агенту та подолання тепловим агентом гідравлічного опору шару вологого матеріалу:

$$Q^{lab} = Q_{t.a.}^{lab} + Q_{\Delta P}^{lab}, \quad (30)$$

де $Q_{t.a.}^{lab}$ – енергетичні витрати на нагрів теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару досліджуваного матеріалу, кДж/кг H_2O ;

$Q_{\Delta P}^{lab}$ – енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору шару досліджуваного матеріалу для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу, кДж/кг H_2O .

Енергетичні витрати на нагрів теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару досліджуваного матеріалу $Q_{t.a.}^{lab}$ було визначено за рівнянням:

$$Q_{t.a.}^{lab} = \frac{c_{t.a.} \cdot G_{t.a.}^{lab} \cdot (T_1 - T_0) \cdot \tau}{\eta_{t.a.} \cdot W^{lab}}, \quad (31)$$

де $c_{t.a.}$ – теплоємність повітря, кДж/кг·°С;

$G_{t.a.}^{lab}$ – масова витрата теплового агенту, кг/с;

T_1 – початкова температура теплового агенту, °С;

T_0 – температура навколишнього середовища, °С;

$\eta_{t.a.}$ – коефіцієнт, який враховує втрати тепла у навколишнє середовище;

W^{lab} – кількість вологи, яка випарувалась, кг.

У свою чергу, енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору шару:

$$Q_{\Delta P}^{lab} = \frac{\Delta P \cdot V_{t.a.}^{lab} \cdot \tau}{\eta_{\Delta P} \cdot W^{lab} \cdot 1000}, \quad (32)$$

де $V_{t.a.}^{lab}$ – об'ємна витрата теплового агенту, м³/с;

$\eta_{\Delta P}$ – коефіцієнт, який враховує втрати електроенергії.

Втрати тиску у шарі досліджуваного матеріалу ΔP визначали за запропонованими критеріальними рівняннями у розділі 3. Тривалість процесу фільтраційного сушіння було розраховано за запропонованими для кожного виду вторинної сировини рослинного походження рівняннями у розділі 4. Осушення було розраховано від початкової вологості матеріалу ω_1 до кінцевого значення $\omega_2 = 14\%$ (мас.), обраного як найбільше із значень $7 \div 14\%$ (мас.), рекомендованих для тривалого зберігання біомаси та формування альтернативного твердого палива, створеного у розділі 6. Із врахуванням вибору доцільної висоти шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальної тривалості процесу, технологічно доцільними параметрами фільтраційного сушіння є: висота шару матеріалу $H = 120$ мм, температура теплового агенту $T = 90$ °С, швидкість руху теплового агенту $v_0 \approx 1,8$ м/с (табл. 14).

Таблиця 14. Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння за технологічно доцільних параметрів ($H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 \approx 1,8$ м/с)

$Q_{t.a.}^{lab}$, кДж/кг Н ₂ О	$Q_{\Delta P}^{lab}$, кДж/кг Н ₂ О	Q^{lab} , кДж/кг Н ₂ О	N^{lab} , кВт·год/кг Н ₂ О	τ , с
Кукурудзяна післяспиртова барда				
8432,762	1036,201	9468,963	2,630	1399
Ячмінна пивна дробина				
9792,116	3602,591	13394,707	3,721	1901
Відходи виробництва кави				
4060,289	1796,264	5856,553	1,627	627
Буряковий жом				
11380,004	1274,754	12654,758	3,515	2380
Яблучні вичавки				
21279,545	710,475	21990,020	6,108	4544
Жолуді				
11044,531	4290,470	15335,001	4,260	593
Каштани				
17124,681	2942,691	20067,372	5,574	590

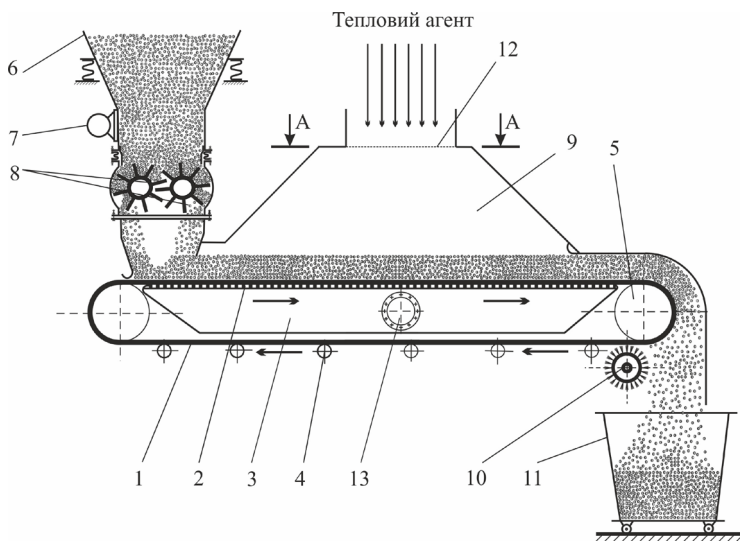


Рис. 28. Установа фільтраційного сушіння: 1) стрічка транспортера; 2) перфорована поверхня камери розрідження; 3) камера розрідження; 4) ролики для підтримання стрічки транспортера; 5) привідний барабан; 6) бункер для вологого матеріалу; 7) вібратор; 8) живильник; 9) сушильна камера; 10) цитка для очищення стрічки транспортера; 11) бункер сухого матеріалу; 12) розподільча решітка; 13) вентилятор

Для промислового осушення вторинної сировини рослинного походження пропонується використувати установку фільтраційного сушіння (рис. 28), основний принцип роботи якої полягає у тому, що вологий матеріал осушується, рухаючись на стрічці транспортеру під впливом потоку теплового агента, що проходить крізь його шар.

Процес виробництва альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження повинен включати 2 основні стадії: попередньої підготовки сировини, тобто процес осушення до показника необхідної вологості, та формування твердого палива, брикетування або гранулювання – залежно від поставленого технологічного завдання (рис. 29).

– залежно від поставленого технологічного завдання (рис. 29).

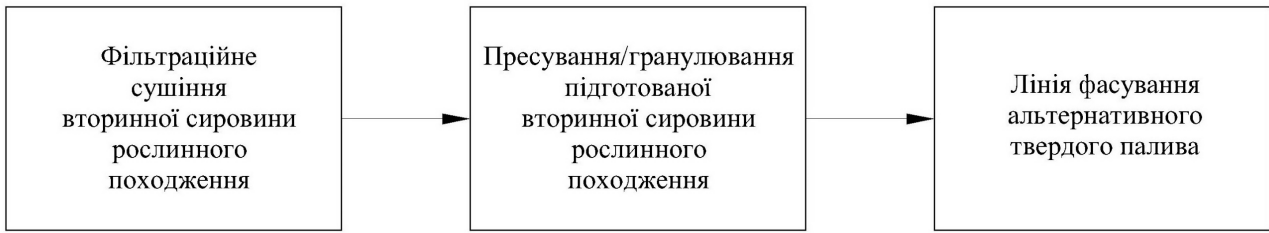


Рис. 29. Принципова блок-схема виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Перевагами запропонованої принципової блок-схеми (рис. 29) є її відносна простота, універсальність використання різних типів обладнання, можливість розгортання на обмежених виробничих площах та на місці накопичення промислових відходів, відсутність громіздкого допоміжного обладнання та можливість роботи у періодичному або безперервному режимах.

Для оцінки ефективності промислового використання було виконано розрахунок параметрів промислового процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі обраних оптимальних параметрів процесу (табл. 15). Під час розрахунків параметри теплового агенту визначали за допомогою $I-d$ діаграми стану вологого повітря.

Зважаючи на відсутність загально прийнятих методик розрахунку сушильного обладнання для фільтраційного сушіння, запропоновано наступний алгоритм розрахунку параметрів процесу для промислової установки:

1. Згідно вихідних даних вологості визначити вологовміст початкового w^c_0 та осушеного w^c матеріалу.
2. Визначити тривалість сушіння за допомогою визначених залежностей у розділі 4.
3. Задати габаритні розміри стрічки транспортеру l установки фільтраційного сушіння (рис. 28) та визначити об'єм V_{mat} та масу G_{mat} матеріалу, що перебуває на стрічці транспортеру у зоні сушіння.
4. Визначити продуктивність за вологим матеріалом G'_l .
5. Визначити об'ємну витрату теплового агенту $Q_{t.a.}$ та масову витрату теплового агенту $G_{t.a.}$.
6. Визначити швидкість транспортеру v_{conv} .
7. Визначені згідно експериментальних даних параметри процесу фільтраційного сушіння уточнити перевірочним розрахунком за допомогою матеріального та теплового балансів.
8. Визначити кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агенту $N_{t.a.}$.
9. Для універсалізації одержаних даних обчислити питомий показник енергетичних витрат на нагрівання теплового агенту для видалення 1 кг вологи з вологого матеріалу.
10. Визначити потужність вентилятора для забезпечення необхідної швидкості руху теплового агенту крізь шар вологого матеріалу.

11. Розрахувати загальну кількість енергії N , яка необхідна для процесу фільтраційного сушіння вологого матеріалу.
12. Визначити питомий показник енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи з осушеного матеріалу для процесу фільтраційного сушіння.

Для порівняння ефективності використання фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження було виконано розрахунок осушення у барабанній сушарці для аналогічної продуктивності за вологим матеріалом G_1 . Як свідчать розрахункові дані (табл. 15), фільтраційний метод сушіння має переваги перед традиційним осушенням у барабанній сушарці – насамперед у тривалості процесу.

Таблиця 15. Питомі енергетичні витрати на проведення промислового процесу фільтраційного сушіння

Вторинна сировина рослинного походження	Час сушіння τ , год		Кількість енергії для процесу осушення N , кВт·год		Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи l , кВт·год / ·кг H ₂ O	
	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Кукурудзяна післяспиртова барда	0,39	4,55	1923,91	2146,92	2,64	3,13
Ячмінна пивна дробина	0,53	5,67	2810,29	2315,65	3,74	3,11
Відходи виробництва кави	0,18	4,24	1163,87	1629,25	1,65	2,37
Буряковий жом	0,65	6,77	2827,04	2673,45	3,28	3,11
Яблучні вичавки	1,31	6,27	5338,08	5132,79	6,36	6,40
Жолуді	0,16	2,14	721,52	1188,76	2,08	3,48
Каштани	0,16	2,02	1275,73	1638,63	2,41	3,28

Загальний економічний ефект буде вищим, зважаючи на високий показник втрат теплоти у доквілля у барабанній сушарці через її великі габаритні розміри, час сушіння, конструктивні особливості, енергоємне додаткове обладнання. Важливо також, що для фільтраційного методу можна використовувати вторинне тепло на підприємствах, в той час як використання барабанної сушарки вимагає нагрівання теплового агенту за допомогою спалювання палива.

ВИСНОВКИ

На основі законів теорії тепло- та масообміну, гідродинаміки стаціонарного шару та кінетики сушіння дисперсних матеріалів, у дисертаційній роботі розроблено наукові положення, висновки та рекомендації, сукупність яких є новими науковообґрунтованими результатами у галузі процесів та обладнання хімічної технології, які розв'язують науково-прикладну проблему гідродинамічних, кінетичних, тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та створення на її основі альтернативного твердого палива. Вирішена науково-технічна проблема дає змогу моделювати та здійснювати розрахунок основних параметрів процесу фільтраційного сушіння, розробляти нові енергозберігаючі технології та обладнання, використовувати вторинну сировину рослинного походження як альтернативне тверде паливо.

1. Обґрунтовано вибір вторинної сировини рослинного походження, що є перспективною з огляду використання для виготовлення альтернативного твердого палива.
2. Встановлено закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння та визначено коефіцієнти модифікованого рівняння Ергана, що дає змогу прогнозувати гідравлічний опір шару та енергетичні витрати на створення перепаду тиску для кожного дослідженого матеріалу. 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.
3. Виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Встановлено, що усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання не перевищує 9 %, що є прийнятною точністю, одержані результати дослідження гідродинаміки під час фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів можна використовувати для розширеного діапазону меж досліджуваних висот стаціонарного шару матеріалу з прийнятною точністю.
4. Узагальнено закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння. Отримано критеріальні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної рослинної сировини для досліджених висот шару матеріалів.
5. Встановлено та узагальнено закономірності кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Встановлено вплив основних параметрів процесу фільтраційного сушіння (висоти вологого матеріалу H , температури теплового агенту T , швидкості руху теплового агенту v_0) на зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу

у часі. Визначено узагальнюючі залежності зміни вологовмісту досліджених матеріалів у часі та тривалості процесу сушіння для досліджених матеріалів для періодів повного насичення теплового агенту вологою та часткового насичення теплового агенту вологою.

6. Встановлено закономірності динаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Показано, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом. Показано, що динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження пропорційно зростає із збільшенням температури теплового агенту та підвищенням швидкості руху теплового агенту. Визначено, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агенту, та збільшенням швидкості руху теплового агенту. Встановлено, що насичення теплового агенту вологою з часом зменшується.
7. Узагальнено результати експериментальних досліджень зовнішнього тепломасообміну процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Визначено усереднені коефіцієнти тепловіддачі для сухого та вологого шару досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження. Визначено коефіцієнти масовіддачі для вологого шару дослідженої 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.
8. Доведено перспективність використання альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. Визначено основні енергетичні характеристики несформованої вторинної сировини рослинного походження.
9. Виготовлено дослідні брикетовані та гранульовані зразки альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження та встановлено основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. Визначено основні теплофізичні характеристики створених твердопаливних зразків. Визначено, що виготовлені зразки твердого палива відповідають існуючим вимогам європейських стандартів.
10. Виконано розрахунок технологічно доцільних параметрів сушильного обладнання для проведення процесу фільтраційного сушіння: висота шару матеріалу $H = 120$ мм, температура теплового агенту $T = 90$ °С, швидкість руху теплового агенту $v_0 \approx 1,8$ м/с.

11. Запропоновано апаратурне оформлення для промислового процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження: установку фільтраційного сушіння для промислового проведення процесу та принципову блок-схему виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.
12. Показано економічну ефективність процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження за допомогою розрахованих питомих енергетичних витрат. Запропоновано алгоритм розрахунку питомих енергетичних показників процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу. Розраховано питомі енергетичні витрати для усіх досліджених матеріалів для промислового проведення процесу. Показано ефективність використання процесу фільтраційного сушіння порівняно із барабанными сушарками, що широко використовуються для сушіння біомаси.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Розділи монографій:

1. Іващук, О., Атаманюк, В., Чижович, Р., Манастирська, В., & Собечко, І. (2022). Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія*, Київ: Яроченко Я. В., 80–92. ISBN: 978-617-7826-23-0 (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
2. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Manastyrskaya, V., Chyzhovych, R., Sobechko, I., & Moravskiy, V. (2023). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain and coffee waste. *The Monograph of the 11th European Young Engineers Conference, Warsaw*, 26–29. ISBN 978-83-953822-1-5 (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
3. Чижович, Р., Іващук, О., & Атаманюк, В. (2023). CFD-моделювання потоку теплового агента через шар ячмінної пивної дробини. *Chemical Technology and Engineering – 2023: Monograph*, Lviv: Rastr-7, с. 7–14. ISBN 978-617-8296-99-5 (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, комп'ютерне моделювання та графіка).
4. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., & Barabakh, S. (2024). Hydrodynamics of filtration drying of food industry secondary raw materials. *The Monograph of the 12th European Young Engineers Conference, Warsaw*, 22–25. ISBN 978-83-953822-2-2 (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).

Статті у наукових фахових виданнях, які включені до наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science):

1. Gnativ, Z. Ya., Ivashchuk, O. S., Hrynychuk, Yu. M., Reutskyi, V. V., Koval, I. Z., & Vashkurak, Yu. Z. (2020). Modeling of internal diffusion mass transfer

- during filtration drying of capillary-porous material. *Mathematical Modeling and Computing*, 7(1), 22–28. **(Scopus, Q4)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
2. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Gnativ, Z. Ya., Chyzhovych, R. A., & Zherebetskyi, R. R. (2021). Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (4), 58–65. **(Scopus, Q3)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).
 3. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiiaieva, S. S., Zherebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022). Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 54–59. **(Scopus, Q3)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 4. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiiaieva, S. S., Duleba, V. P., & Sobechko, I. B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216–221. **(Scopus, Q4; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 5. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2023). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. **(Scopus, Q4; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 6. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Manastyrskaya, V. A., & Sobechko, I. B. (2023). Using of barley bran in the production of alternative solid fuel from coffee production waste. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(2), 318–324. **(Scopus, Q4; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 7. Ivashchuk, O.S., Atamanyuk, V.M., Chyzhovych, R.A., & Barabakh, S.A. (2024). Kinetic regularities of filtration drying of corn alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 12–20. **(Scopus, Q3)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).
 8. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Gnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. **(Scopus, Q3; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).
 9. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Sobechko, I. (2024). Research of solid fuel production from horse chestnut seeds. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(1), 131–137. **(Scopus, Q4; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 10. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., & Chyzhovych, R. (2024). Investigation of regularities of the filtration drying kinetics of coffee production waste. *Food*

Science and Technology, 18(1), 65-72. **(Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).

11. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., & Chyzhovych, R. A. (2024). Efficiency investigation of coffee production waste drying by filtration method. *Journal of Engineering Sciences*, 11(2), F9–F16. **(Scopus, Q4; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, розробка алгоритму та виконання розрахунків).
12. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Sobechko, I. (2024). Research of common oak acorns use for alternate solid fuel production. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(3), 599-604. **(Scopus, Q4; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
13. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., Atamanyuk, V., & Hnativ, Z. (2023). The Computer Modeling of the Thermal Agent Hydrodynamics Through the Alcohol Distillery Stillage Stationary Layer. *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Jaroslaw, Poland: p. 1–4. **(Scopus; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, комп'ютерне моделювання та графіка).
14. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., & Atamanyuk, V. (2024). Simulation of the thermal agent movement hydrodynamics through the stationary layer of the alcohol distillery stillage. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100566. **(Scopus, Q1)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, комп'ютерне моделювання та графіка).
15. Ivashchuk, O.S., Atamanyuk, V.M., & Chyzhovych, R.A. (2024). Valourization of using efficiency of filtration drying for alcohol distillery stillage. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100820. **(Scopus, Q1)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, розробка алгоритму та виконання розрахунків).
16. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., & Sobechko, I. (2024). Evaluation of the Apple Pomace Use as a Raw Material for Alternative Solid Fuel. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(4), 1120529. **(Scopus, Q1; Web of Science)** (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Іващук, О.С., Атаманюк, В.М., Чижович, Р.А., & Барабах, С.А. (2024). Визначення оптимальних параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(1), 183–187. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
2. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., & Boldyryev, S. (2024). Investigation of the beet pulp filtration drying kinetics. *Environmental Problems*,

9(3), 179–186. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, розробка алгоритму та математична обробка результатів).

3. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., & Чижович, Р. А. (2024). Дослідження гідродинаміки руху теплового агенту для фільтраційного сушіння бурякового жому. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 3(23), 9–18. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, комп’ютерне моделювання та графіка).
4. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Vacho, S., & Boldryev, S. (2024). Investigation of the efficiency of a beet pulp filtration drying process. *Environmental Problems*, 9(4), 268–274. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, розробка алгоритму та математична обробка результатів).
5. Іващук, О.С., Атаманюк, В.М., & Чижович, Р.А. (2024). Оцінка ефективності використання фільтраційного сушіння для промислового осушення пивної дробини. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(2), 161–167. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, розробка алгоритму та математична обробка результатів).
6. Іващук, О., Атаманюк, В., Чижович, Р., Манастирська, В., & Собечко, І. (2024). Дослідження виготовлення альтернативного твердого палива з бурякового жому. *Scientific Works*, 88(1), 70–75. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).

Патенти:

1. Іващук, О., Атаманюк, В., & Чижович, Р. (2024, Липень 3). Патент України №128410 С2, МПК С10L 5/44 (2006.01), В09В 3/32 (2022.01) “Тверде паливо” Іващук, О.С., Атаманюк, В.М., Чижович, Р.А. – Заявка № а 2021 04475 від 02.08.2021 р., Національний університет «Львівська Політехніка». (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kuzminchuk, T., Zherebetskyi, R., & Kiiaieva, S. (2021). Research of the calorific value of dried alcohol distillery stillage. *3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings*, 200–201. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
2. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Кузьмінчук, Т. А., Кіяєва, С. С., & Жеребецький, Р. Р. (2021). Дослідження теплотворної здатності осушеної післяспиртової барди. *Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 56–57. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
3. Кіяєва, С. С., Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., & Кузьмінчук, Т. А. (2022). Дослідження кінетики фільтраційного сушіння пивної дробини. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність*.

- Збалансоване природокористування. VII Міжнародний молодіжний конгрес, Львів, Україна, 159. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).*
4. Chyzhovych, R. A., Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Kiiiaieva, S. S., Zherebetskyi, R., & Kovalchuk, A. (2022). Research of the solid fuel briquettes obtaining from alcohol distillery stillage. *The Monograph of the 10th European Young Engineers Conference*, 83. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 5. Kiiiaieva, S. S., Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kuzminchuk, T. A., & Kovalchuk, A. (2022). Research into kinetic regularities the brewers grains filtration drying. *The Monograph of the 10th European Young Engineers Conference*, Warsaw, Poland, 83. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 6. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Кіяєва, С. С., Дулеба, В. П., & Ковальчук, А. (2022). Фільтраційне сушіння пивної дробини. *XI Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості»: матеріали конференції*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 161. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 7. Іващук, О. С. (2022). Альтернативне тверде паливо з відходів харчової промисловості. *Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, Дніпро, 123–124.
 8. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Манастирська, В. А., & Собечко, І. Б. (2022). Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VII Міжнародний конгрес*, 73. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 9. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Hnativ, Z. Ya., & Kiiiaieva, S. S. (2022). Filtration drying of food industry waste. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph* / edited by V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda, V. Khomenko, 85–86. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 10. Ivashchuk, O. S., Chyzhovych, R. A., & Atamanyuk, V. M. (2023). CFD-Modeling of Thermal Agent Flow Through a Layer of Barley Brewer's Spent Grain. *2023 4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering». Proceedings*, 31–37. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, комп'ютерне моделювання та графіка).
 11. Chyzhovych, R. A., Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Hnativ, Z. Ya., Kiiiaieva, S. S., & Manastyrskaya, V. A. (2023). Filtration drying of secondary raw materials of organic origin. *The Monograph of the 11th European Young*

- Engineers Conference*, 66. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
12. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Manastyrskaya, V., Chyzhovych, R. A., Sobechko, I., & Moravskiy, V. (2023). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain and coffee waste. *The Monograph of the 11th European Young Engineers Conference*, 67. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 13. Іващук, О., Атаманюк, В., Чижович, Р., & Барабах, С. (2024). Оцінка ефективності використання фільтраційного сушіння для осушення біомаси. Сталій розвиток – стан та перспективи. *IV міжнародний науковий симпозіум в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES»)*, Україна, Львів – Славське, 98–100. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 14. Chyzhovych, R. A., Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Varabakh, S., & Manastyrskaya, V. (2024). Hydrodynamics of barley brewer's spent grain filtration drying. *The Monograph of the 12th European Young Engineers Conference*, 105. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).
 15. Чижович, Р., Іващук, О., Атаманюк, В., & Барабах, С. (2024). Розрахунок оптимальних параметрів фільтраційного сушіння післяспиртової барди. *Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. IX Міжнародний молодіжний конгрес*, Львів, 236. (постановка і виконання експериментальних досліджень, опис та математична обробка результатів).
 16. Іващук, О., Атаманюк, В., & Чижович, Р. (2024). Дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння бурякового жому. *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024): інженерія, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції*, Луцьк, 120–121. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).
 17. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Барабах, С., Кіяєва, С. С., & Гнатів, З. Я. (2024). Кінетичні закономірності фільтраційного сушіння відходів виробництва кави. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості»: матеріали конференції.*, Львів, 136–137. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів, побудова графічних залежностей).
 18. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Manastyrskaya, V., & Sobechko, I. (2024). Beet pulp as a raw material for the alternative solid fuel. *Збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»*, Одеса, 34–35. (постановка і виконання експериментальних досліджень, обробка і опис результатів).

АНОТАЦІЯ

Іващук О.С. Наукові основи тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню гідродинаміки, кінетики та динаміки тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження, створення на її основі зразків альтернативного твердого палива, дослідження основних енергетичних характеристик альтернативного твердого палива, а також розроблення апаратурного оформлення для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Визначено критеріальні рівняння для опису гідравлічного опору шару досліджуваних матеріалів у процесі фільтраційного сушіння. Встановлено критеріальні рівняння для опису зміни вологовмісту досліджуваних матеріалів у часі та тривалості фільтраційного сушіння для періодів повного та часткового насичення теплового агенту вологою. Узагальнено результати експериментальних досліджень зовнішнього тепломасообміну процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та визначено основні коефіцієнти тепло- та масовіддачі для досліджуваних матеріалів. Встановлено перспективність використання альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження на основі визначених основних теплотворних характеристик. Виконано розрахунок технологічно доцільних параметрів сушильного обладнання для проведення процесу фільтраційного сушіння та запропоновано його апаратурне оформлення.

Ключові слова: теплообмін, масообмін, гідродинаміка, кінетика, динаміка, вологовміст, температура, тепловий агент, фільтраційне сушіння, альтернативне тверде паливо, біомаса.

ABSTRACT

Ivashchuk O.S. Scientific bases of heat and mass transfer processes in the alternative solid fuels production from secondary raw materials of plant origin. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.17.08 Processes and equipment of chemical technology – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of hydrodynamics, kinetics and dynamics of heat and mass transfer processes during filtration drying of secondary raw materials of plant origin, the creation of samples of alternative solid fuels on its basis, the study of the main energetic characteristics of alternative solid fuels, as well as the development of hardware design for filtration drying of secondary raw materials of plant origin. The criterion equations for describing the hydraulic resistance of the layer

of the studied materials in the process of filtration drying were determined. Criterion equations have been established to describe the change in moisture content of the materials under study over time and the duration of filtration drying for periods of complete and partial saturation of the thermal agent with moisture. The results of experimental studies of the external heat and mass transfer of the filtration drying process of secondary raw materials of plant origin are summarized and the main heat and mass transfer coefficients for the studied materials during the filtration drying process are determined. The prospects for the use of alternative solid fuels from secondary raw materials of plant origin based on the determined basic calorific characteristics were determined. The calculation of technologically feasible parameters of drying equipment for the filtration drying process of secondary raw materials of plant origin was performed and its hardware design was proposed.

Keywords: heat transfer, mass transfer, hydrodynamics, kinetics, dynamics, moisture content, temperature, thermal agent, filtration drying, alternative solid fuels, biomass.