

ОМІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ГОСОВСЬКИЙ РОМАН РОМАНОВИЧ



УДК 66.047.4

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ОРГАНІЧНОЇ
СИРОВИНИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі хімічної інженерії Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, м. Львів

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Атаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри хімічної інженерії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Білей Петро Васильович,
Національний лісотехнічний університет України,
завідувач кафедри технологій лісопиляння, столярних і
дерев'яних будівельних виробів

доктор технічних наук, доцент
Ляпощенко Олександр Олександрович,
Сумський державний університет,
доцент кафедри процесів та обладнання хімічних і
нафтопереробних виробництв

Захист відбудеться “23” квітня 2018 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.09 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, пл. Св. Юра, 9, навчальний корпус ІХ, ауд. 214).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “___” березня 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.09
доктор технічних наук, проф.*



Я.М. Гумницький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Фільтраційне сушіння є високоінтенсивним методом зневоднення вологих дисперсних матеріалів. Профільтровування теплового агента крізь пористу структуру стаціонарного шару вологого дисперсного матеріалу дає змогу забезпечити науково обґрунтовані та економічно вигідні технологічні параметри процесу сушіння та забезпечити високу якість готової продукції. Вологі дисперсні матеріали характеризуються великою різноманітністю фізико-механічних властивостей, зокрема початковим вологовмістом, кількістю вільної та зв'язаної вологи, внутрішньою структурною будовою частинок, розміром пор та капілярів, у яких міститься волога, полідисперсністю та порізністю стаціонарного шару та іншими параметрами, які визначають енергетичні затрати на процес сушіння. Сушіння органічної сировини є складною технологічною та тепломасообмінною задачею. Це пов'язано, в першу чергу, тим, що у більшості матеріалів органічного походження волога міститься у клітинах та міжклітинному просторі. Процеси теплообміну між вологим матеріалом і тепловим агентом лімітуються низькою теплопровідністю органічного матеріалу, а масообміну – інтенсивністю перенесення вологи з клітин у міжклітинний простір і через мікро і макропори у тепловий агент.

Аналіз наявних джерел літератури показав, що процеси тепло- і масообміну під час фільтраційного сушіння органічної сировини вивчені недостатньо, тому експериментальні і теоретичні дослідження висушування вологих дисперсних матеріалів органічного походження є актуальною задачею, що вирішує науково-прикладну задачу.

В умовах енергетичної та економічної кризи, для розвитку теплової енергетики України, перспективним є використання альтернативних видів палива, виготовлених з місцевих ресурсів рослинної сировини. Агропромисловий комплекс України щорічно генерує великий обсяг різноманітних відходів та залишків, які на даний час утилізуються нераціонально. Відомо, що у післязбиральний період на полях залишається приблизно 300-600 ц/га стебел соняшника. Зважаючи, що нижча теплотворна здатність подрібнених стебел соняшника становить 12,5 МДж/кг, то одним із раціональних методів їх утилізації є виробництво альтернативного твердого палива з такого виду сировини, а використання фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника забезпечить низьку собівартість та необхідну якість висушеного матеріалу для виготовлення паливних брикетів і дасть змогу зменшити частку застосування традиційних джерел енергії (електрики і газу) в державному та приватному секторах, що сприятиме підвищенню енергоефективності економіки держави.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема роботи відповідає науковому напрямку кафедри хімічної інженерії, Інституту хімії та хімічних технологій Національного університету "Львівська політехніка". Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи згідно зареєстрованих тематик: "Дослідження процесів тепломасообміну в системах з твердою фазою" (номер державної реєстрації 0112U007340) та "Гідродинаміка і тепломасообмін в системі тверде тіло - газ, тверде тіло – рідина" (номер державної реєстрації 0117U004122).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є дослідження основних закономірностей фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника, зокрема, гідродинаміки, тепломасообміну, внутрішньодифузійних процесів перенесення вологи та кінетики зневоднення для подальшого брикетування та отриманням альтернативного палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати критичний аналіз джерел літератури щодо сушіння дисперсних матеріалів рослинного походження;
- визначити фізико-механічні характеристики полідисперсної суміші подрібнених стебел соняшника;
- дослідити гідродинаміку руху теплового агента крізь пористу структуру шару подрібнених стебел соняшника, визначити коефіцієнт опору матеріалу під час профільтрування газового потоку та представити результати експериментальних досліджень у вигляді безрозмірних комплексів;
- дослідити процеси тепломасообміну між тепловим агентом та полідисперсною сумішшю сухих і вологих подрібнених стебел соняшника під час фільтраційного сушіння та представити узагальнення результатів експериментальних досліджень у безрозмірній формі;
- дослідити процес внутрішньодифузійного масоперенесення вологи з частинок подрібнених стебел соняшника та визначити значення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії для подрібнених зовнішніх та внутрішніх частин стебел;
- дослідити кінетику фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника за різних режимних параметрів для визначення раціональних параметрів реалізації процесу фільтраційного сушіння;
- визначити оптимальне значення вологовмісту подрібнених стебел соняшника, за якого різниця між значенням нижчої теплотворної здатності та затратами на фільтраційне сушіння є максимальною;
- визначити основні характеристики брикетів з подрібнених стебел соняшника, висушених фільтраційним методом.
- порівняти отримані результати досліджень із результатами сушіння традиційними методами.

Об'єкт дослідження – процес сушіння подрібнених стебел соняшника фільтраційним методом.

Предмет дослідження – гідродинамічні, тепломасообмінні, кінетичні закономірності та дифузійні процеси фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи фізичного і математичного моделювання. Для визначення гранулометричного складу полідисперсної суміші подрібнених стебел соняшника використовували ситовий аналіз, а для визначення структурної будови окремих частин і шару використовували пікнометричний та мікроскопічний методи. Експериментальні дослідження теплообміну здійснювали за допомогою методів теплофізичного моделювання з використанням восьмиканального інтелектуального вимірювального перетворювача РТ8-1000 з виводом інформації на персональний комп'ютер. Для розв'язку диференційних рівнянь використовували числові та аналітичні методи.

Для опрацювання та узагальнення результатів експериментальних досліджень використовували комп'ютерну техніку та пакети прикладних програм, а саме: Excel, Graf4Win, Corel Draw, MathCAD, AutoCAD.

Наукова новизна. У результаті комплексного теоретичного й експериментального дослідження гідродинаміки, тепломасообміну, внутрішньодифузійних процесів та кінетики фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника, у роботі отримано такі наукові результати:

- коефіцієнт опору стаціонарного шару подрібнених стебел соняшника, що дає змогу застосовувати залежність Дарсі-Вейсбаха для визначення втрат тиску у шарі матеріалу під час профільтовування газового потоку;

- розрахункові залежності у безрозмірній формі для прогнозування гідродинаміки фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника;

- критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі, які дають змогу розрахувати технологічні параметри процесу фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника;

- математичні моделі внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння подрібнених зовнішніх та внутрішніх тканин стебел соняшника;

- залежності для розрахунку коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії вологи з частинок подрібнених зовнішніх та внутрішніх тканин стебел соняшника за різних температур теплового агенту.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані, внаслідок узагальнення результатів теоретичних й експериментальних досліджень процесу фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника, критеріальні залежності гідродинаміки та тепломасообміну в стаціонарному шарі, дають змогу прогнозувати енергетичні затрати та економічну доцільність процесу, розраховувати оптимальні коефіцієнти тепло- і масообміну, обирати раціональні параметри теплового агенту для забезпечення високої інтенсивності процесу та визначити оптимальне значення вологовмісту подрібнених стебел соняшника, за якого різниця між значенням нижчої теплотворної здатності та затратами на фільтраційне сушіння є максимально можливою. Розроблена методика розрахунку основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння та запропонована принципова схема установки, яка захищена патентом України на корисну модель. Виготовлена експериментальна партія брикетів з подрібнених стебел соняшника та встановлена відповідність їх фізико-механічних властивостей існуючим стандартам. Практична реалізація отриманих результатів дисертаційної роботи полягає у передачі результатів теоретичних та експериментальних досліджень ПП «Тайфун-Плюс» та ПП «Роман» для впровадження у виробництво та у навчальний процес кафедри хімічної інженерії під час викладання лекційних курсів: «Методологія експериментальних і теоретичних досліджень тепло- і масообмінних процесів», «Процеси та апарати хімічної технології» та «Методологія фізичного моделювання хіміко-технологічних процесів» для студентів-магістрів і під час виконання магістерських робіт (додаток А).

Особистий внесок здобувача полягає у підборі, розробці, апробації методик та проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі дослідних даних

гідродинаміки, тепло- і масообміну, внутрішньодифузійних процесів та кінетики фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника; узагальненні результатів експериментальних досліджень та підготовці матеріалів до публікації; розробленні принципової схеми установки фільтраційного сушіння та оформленні патенту. Автор висловлює вдячність доц. Кіндзері Д.П. за надану допомогу під час виконання експериментальних досліджень та оформлення дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та опубліковані в матеріалах міжнародних і вітчизняних наукових і науково-практичних конференцій, а саме: міжнародній конференції «Сучасні технології та обладнання харчових виробництв» (м. Тернопіль, 2011); 2-му, 3-му та 4-му Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2012, 2014, 2016); II Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві», (м. Суми, 2012); Actual problems of chemistry and technology of organic substances APCOS2 (Lviv, Ukraine, 2015); 6th International youth science forum «Litteris et artibus» (Lviv, Ukraine, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (м. Київ, 2016); Науковому семінарі Сталий розвиток – погляд у майбутнє (м. Львів, 2017).

Публікації. Основні положення та результати роботи відображені у 18 наукових працях, з яких 8 статей у наукових фахових виданнях України, зокрема 1 стаття у виданні, яке входить до наукометричних баз даних Scopus, 1 стаття у виданні, яке входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, 9 тез доповідей на міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, а також 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновку, використаних джерел літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 167 сторінок, яка включає 37 малюнків, 16 таблиць, 147 найменувань списку використаних джерел та п'ять додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, наукова новизна та практичне значення, наведені відомості про особистий внесок автора і апробацію отриманих результатів.

В першому розділі дисертаційної роботи зроблено критичний аналіз джерел літератури щодо основних способів та режимів сушіння вологих дисперсних матеріалів. Встановлено, що фільтраційний метод сушіння є найбільш ефективний для зневоднення вологих дисперсних матеріалів. Обґрунтовано, що наявних теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки, зовнішнього та внутрішнього тепломасообміну є недостатньо для широкого впровадження у промисловість методу фільтраційного сушіння, зокрема для сушіння подрібнених стебел соняшника. На основі аналізу літератури сформовано мету і завдання досліджень.

У другому розділі наведено основні характеристики окремих частинок та стаціонарного шару подрібнених стебел соняшника. На основі аналізу зрізів стебел

соняшника, встановлено, що вони мають складну багатошарову структуру, утворену з відмінних за своєю будовою тканин. Зовнішніми тканинами стебел є епідерма, первинна кора (коленхіма та хлоренхіма), склеренхіма, первинна та вторинна флоєми та ксилема, міжпучковий камбій. Ці тканини утворені з товстостінних клітин невеликих розмірів (рис. 1). Серцевину стебел формує паренхімна тканина (рис. 2), утворена великими тонкостінними клітинами, основною функцією яких є накопичення поживних речовин (крохмалю, жирів, тощо).

Наведений опис експериментальної установки для фізичного моделювання тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння та наведено методики визначення основних параметрів пористої структури стаціонарного шару; усереднення розмірів подрібнених частинок стебел соняшника; дослідження гідродинаміки; тепломасообміну; внутрішньодифузійного масоперенесення та кінетики, а також оцінку похибок вимірювання.

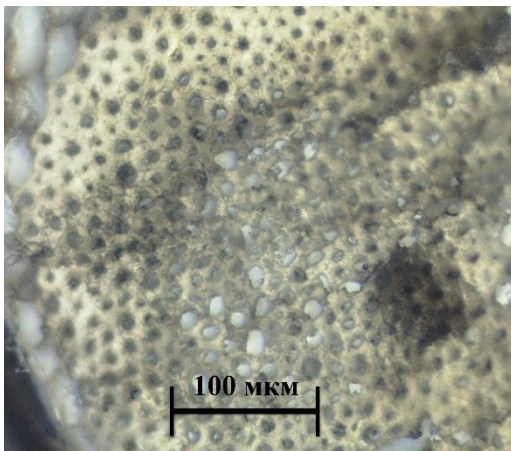


Рис. 1. Поперечний переріз зовнішньої тканини стебла соняшника

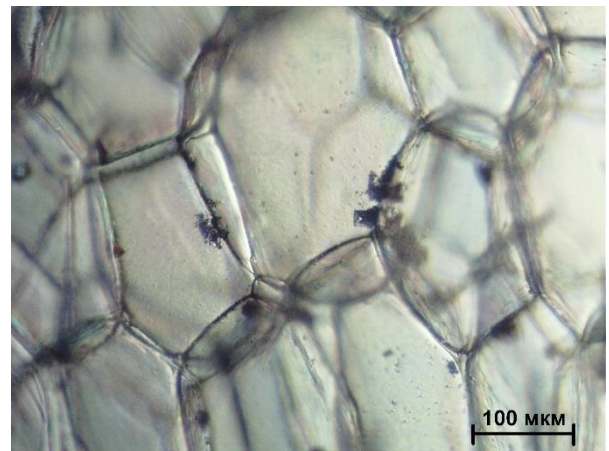


Рис. 2. Поперечний переріз внутрішньої тканини стебла соняшника

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень гідродинаміки під час фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар полідисперсної суміші частинок неправильної форми з подрібнених стебел соняшника.

Враховуючи те, що на втрати тиску в стаціонарному шарі мають вплив форма, гранулометричний склад, порізність та питома поверхня частинок подрібнених стебел соняшника, визначили гранулометричний склад та фізико-механічні характеристики стаціонарного шару. Результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні фізико-механічні характеристики шару подрібнених стебел соняшника

Показники	$d_e \cdot 10^3$, м	$d_c \cdot 10^3$, м	$\rho_{нас}$, кг/м ³	$\rho_{уявн}$, кг/м ³	$\rho_{іст}$, кг/м ³	$\epsilon_{сум}$, м ³ /м ³	$\epsilon_{вн}$, м ³ /м ³	$\epsilon_{ш}$, м ³ /м ³	a , м ² /м ³
Значення	0,376	2,7	160	270	895	0,82	0,42	0,4	4200

Результати експериментальних досліджень втрат тиску ΔP як функції фіктивної швидкості фільтрування теплового агента v_0 крізь стаціонарний шар подрібнених стебел соняшника наведені на рис. 3. Як видно з рис. 3, при збільшенні висоти

шару H подрібнених стебел соняшника зростає гідравлічний опір, проте його значення є відносно невеликим, що є позитивним для організації даного методу сушіння. Залежність втрат тиску від фіктивної швидкості носить параболічний характер, що вказує на вплив як інерційної, так і в'язкісної складових. Для узагальнення результатів експериментальних досліджень на основі внутрішньої задачі гідродинаміки їх представляли у безрозмірній формі у вигляді критеріальної залежності $Eu = f(H_e/d_e)$ за різних чисел Рейнольдса (рис. 4). Аналіз рис. 4 вказує на лінійну залежність числа Ейлера від геометричного симплексу, разом із цим вплив числа Рейнольдса на втрати тиску носять нелінійний характер, про що свідчить зміна кута нахилу прямих до осі абсцис. На основі визначених значень тангенсу кута нахилу прямих до осі абсцис $tg\alpha$ від числа Рейнольдса побудована графічна залежність, яка наведена на рис. 5. Апроксимувавши експериментальні дані (рис. 3) степеневою функцією, втрати тиску в стаціонарному шарі подрібнених стебел соняшника можна представити у вигляді розрахункової залежності:

$$Eu = 10,7 \cdot Re_e^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (1)$$

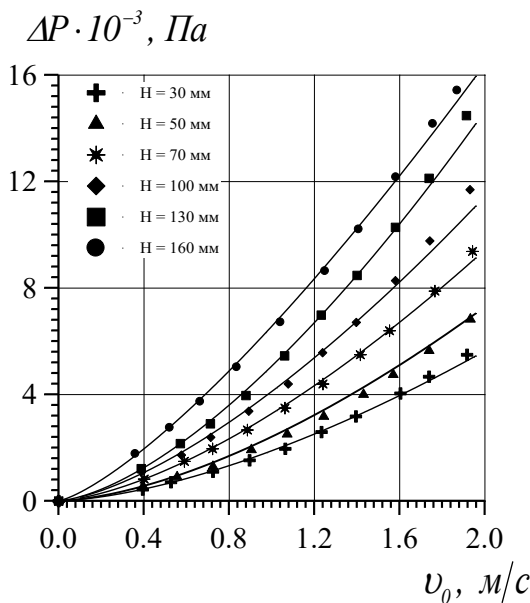


Рис. 3. Залежність втрат тиску ΔP в стаціонарному шарі подрібнених стебел соняшника від фіктивної швидкості v_0 для різних висот шару матеріалу

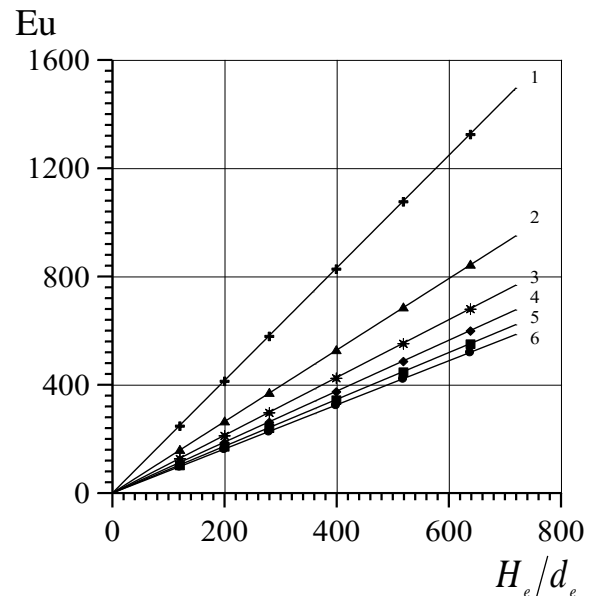


Рис. 4. Залежність чисел Ейлера Eu від числових значень геометричного симплексу H_e/d_e для подрібнених стебел соняшника

Звідки

$$\Delta P_T = 10,7 \cdot Re_e^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

Залежність (2) дає змогу прогнозувати втрати тиску під час фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника і її зручно використовувати на стадії проектування сушильного обладнання за подібних гідродинамічних умов в межах зміни числа Рейнольдса $20 \leq Re_e \leq 120$.

Під час експлуатації сушильного обладнання часто виникає потреба змінити (збільшити або зменшити) продуктивність по висушеному продуктові. В цьому

випадку зручно користуватися залежністю Дарсі-Вейсбаха, якщо відомий коефіцієнт опору λ . Тому експериментальні дані (рис.3), були представлені у вигляді графічної залежності числа Ейлера від числа Рейнольдса $Eu = f(Re_e)$.

Графічна залежність (рис. 6) дає змогу прогнозувати втрати тиску за відомих режимів руху теплового агента крізь стаціонарний шар подрібнених стебел соняшника різної висоти.

Для визначення коефіцієнту опору λ , експериментальні дані наведені на рис. 3 представляли у вигляді функціональної залежності $\lambda = f(Re_e)$ (рис. 7). Як видно з рис. 7, крива має вигляд гіперболи, яку можна апроксимувати степеневою функцією. Апроксимація результатів експериментальних досліджень степеневою функцією (рис. 7) дала змогу представити коефіцієнт опору у вигляді розрахункової залежності:

$$\lambda = \frac{30}{Re_e^{0,7}} + 1 \quad (3)$$

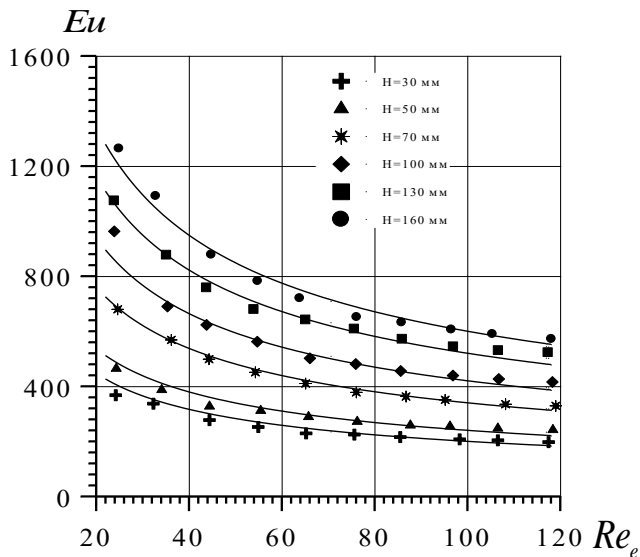


Рис. 6. Залежність числа Ейлера Eu від числа Рейнольдса Re_e для подрібнених стебел соняшника

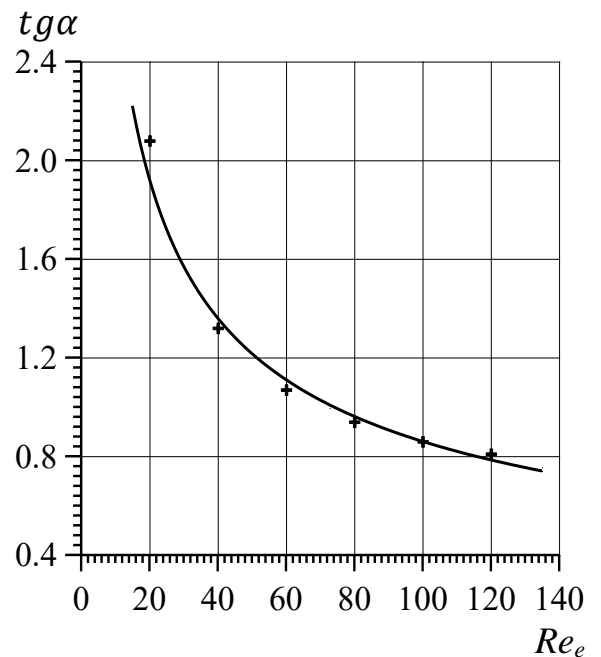


Рис. 5. Залежність $tg\alpha$ від числа Рейнольдса Re_e для подрібнених стебел соняшника

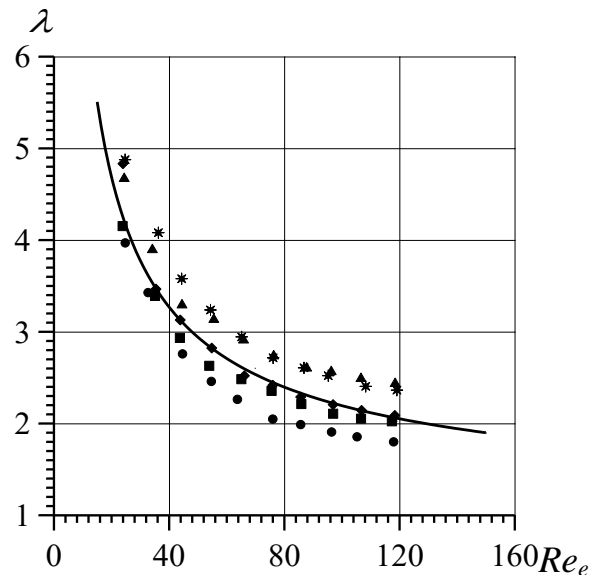


Рис. 7. Залежність коефіцієнту опору λ від числа Рейнольдса Re_e для подрібнених стебел соняшника (позначення відповідають рис. 3)

Залежність (3) дає змогу прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння використовуючи рівняння Дарсі-Вейсбаха $\Delta P = \lambda \cdot H_e \cdot \rho \cdot v^2 / (2 \cdot d_e)$ в межах режимів фільтрування теплового агента ($20 \leq Re_e \leq 120$), з достатньою для проектних розрахунків точністю.

Отже, для узагальнення результатів досліджень гідродинаміки під час профільтрування газового потоку крізь шар подрібнених стебел соняшника було використано два методи: перший, що базується на представленні результатів досліджень у безрозмірній формі та другий, що базується на використанні рівняння Дарсі-Вейсбаха. Порівняння теоретично розрахованих значень втрат тиску за залежністю (2) і рівнянням Дарсі-Вейсбаха з використанням залежності (3) та експериментальними даними показали хороше їх співпадіння (абсолютне значення похибки не перевищує 20%), що дає змогу зробити висновок про можливість використання обидвох методів для практичного застосування.

У четвертому розділі представлені дослідження зовнішнього та внутрішнього тепломасообміну між тепловим агентом і частинками подрібнених стебел соняшника, внутрішньодифузійних процесів та кінетики фільтраційного сушіння. Визначені усереднені значення температури теплового агента на виході із шару сухих подрібнених стебел соняшника за швидкостей його фільтрування від 0,68 до 2,05 м/с наведені на рис. 8. Коефіцієнти тепловіддачі від теплового агента до подрібнених стебел соняшника визначали за законом конвективного теплообміну Ньютона у короткому шарі, щоби падіння температури по його висоті було незначним. Температура над поверхнею шару підтримували постійною з точністю $\pm 0,5$ К. Визначені значення коефіцієнтів тепловіддачі α для сухого матеріалу залежно від дійсної швидкості фільтрування теплового агента v наведені на рис. 9а.

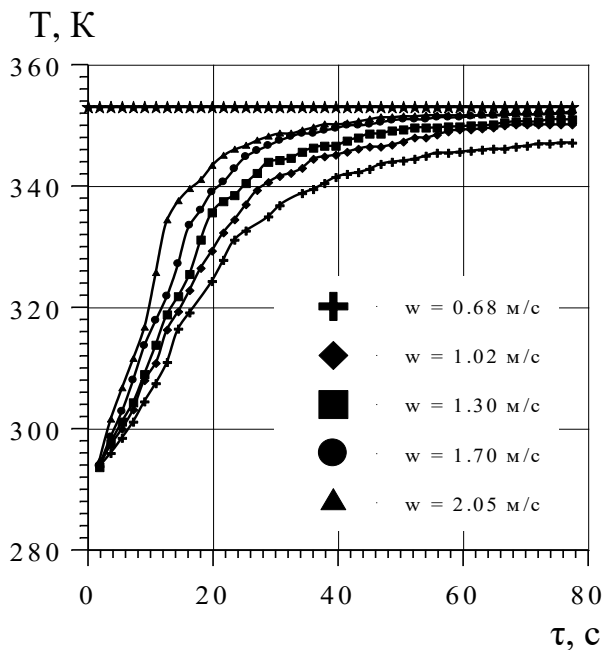


Рис. 8. Зміна температури T теплового агента в часі τ на виході з шару сухих подрібнених стебел соняшника за різних швидкостей

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі від теплового агента до матеріалу, процес проводили у короткому шарі, а час експерименту становив 15с. Вважали, що вся теплота теплового агента затрачається на випаровування вологи у першому періоді сушіння, а температура вологого матеріалу відповідає температурі мокрого термометра. Коефіцієнти тепловіддачі за різних швидкостей теплового агента визначали на основі кінетичного рівняння $\Delta W / \Delta \tau \cdot r = \alpha \cdot F \cdot (t_{\text{вх}} + t_{\text{вих}} / 2 - t_{\text{м.м}})$.

Результати розрахунків наведені на рис.9б. Аналіз рис. 9б показує, що коефіцієнти тепловіддачі лінійно зростають із ростом дійсної швидкості фільтрування теплового агента, при цьому коефіцієнти тепловіддачі для вологих подрібнених стебел соняшника є значно

меншими, ніж для сухих, за однакових гідродинамічних умов, що пояснюється незначною кількістю вільної вологи, яка випаровується у першому періоді сушіння.

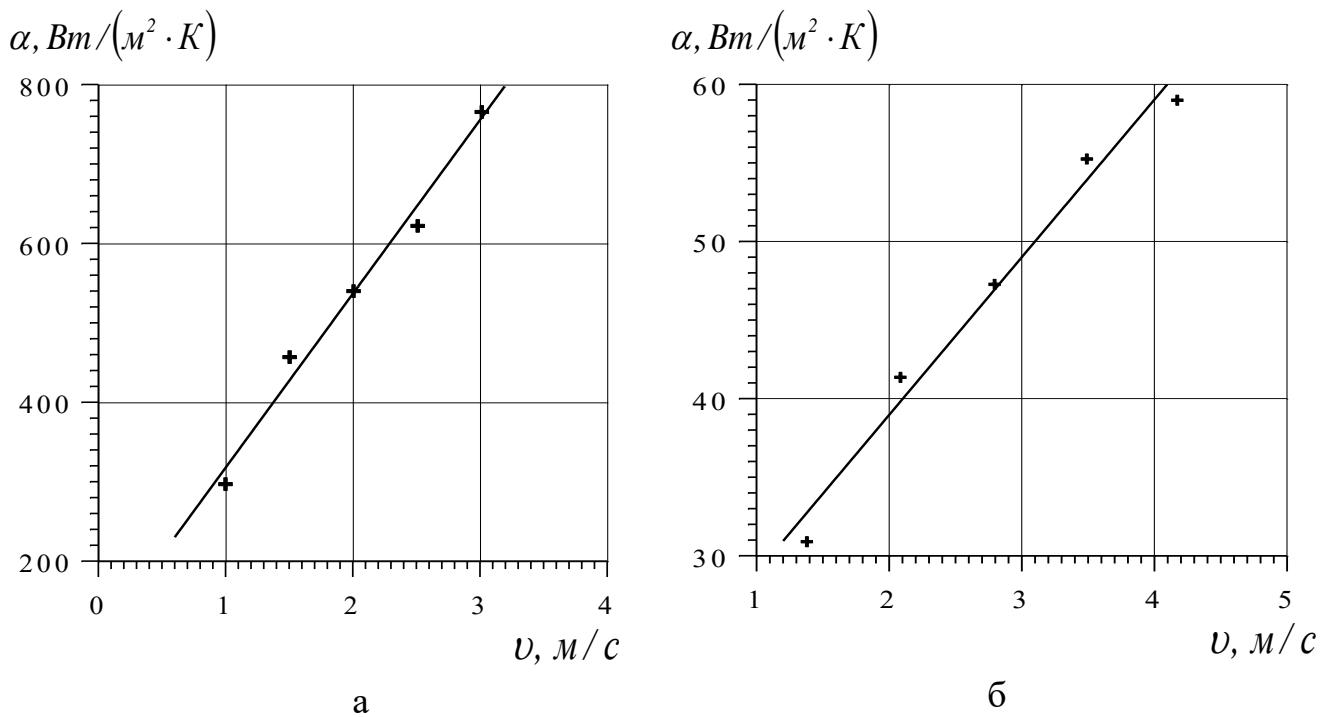


Рис. 9. Залежність коефіцієнта тепловіддачі α від дійсної швидкості фільтрування U теплового агента для сухих (а) та вологих (б) подрібнених стебел соняшника

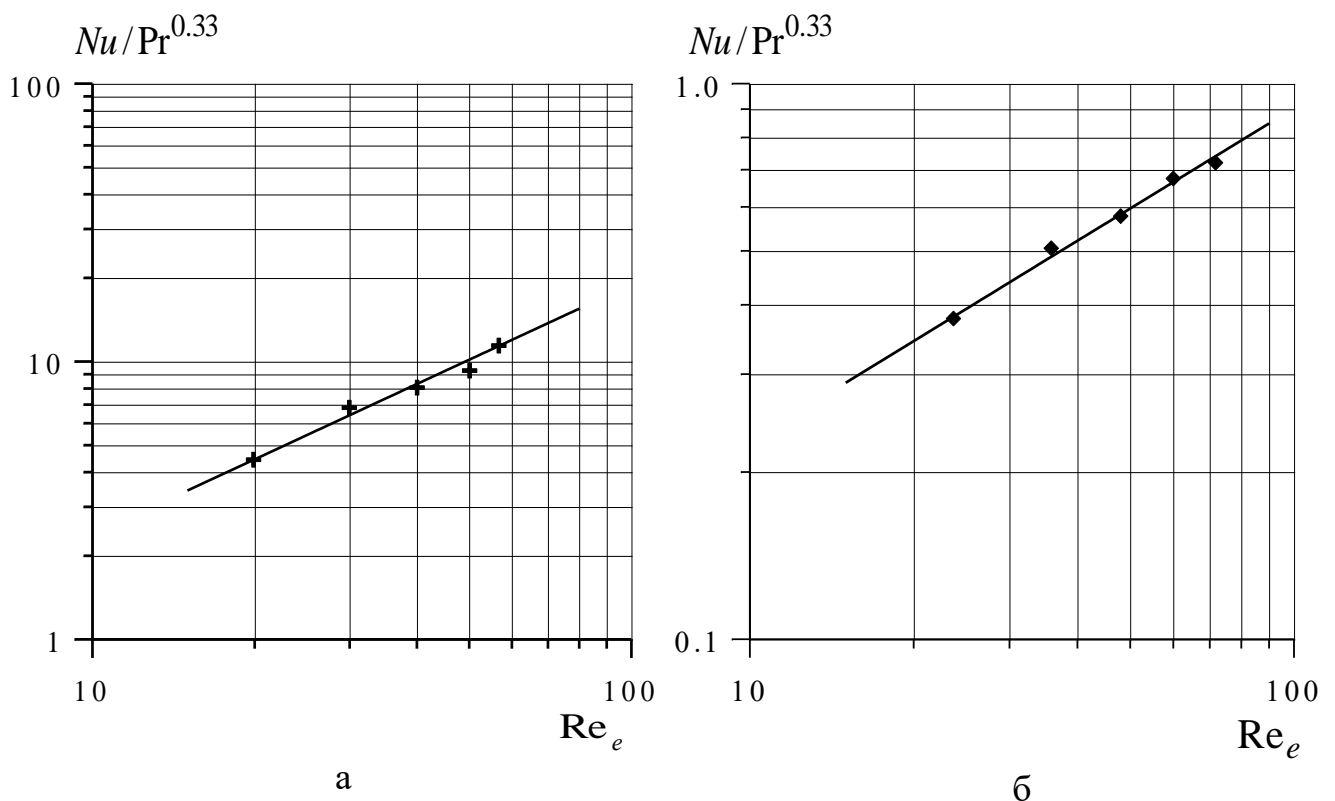


Рис. 10. Залежність $Nu / Pr^{0.33} = f(Re_e)$ для сухого (а) та вологого (б) шару подрібнених стебел соняшника, за температури 353К

Для узагальнення отриманих результатів рис. 9а і 9б їх представляли графічно у безрозмірній формі у вигляді функціональної залежності між критеріями подібності $Nu/Pr^{0.33} = f(Re_e)$, що зображено на рис. 10а і 10б. За визначальний лінійний розмір приймали еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий

агент. Представивши результати експериментальних досліджень у логарифмічних координатах та апроксимували їх степеневу функцією отримали наступні розрахункові залежності:

- для сухих частинок подрібнених стебел соняшника:

$$Nu = 0,14 \cdot Re_e^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \quad (4)$$

- для вологих частинок подрібнених стебел соняшника:

$$Nu = 0,145 \cdot Re_e^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (5)$$

Аналіз критеріальних залежностей (4) і (5) вказує, що теплообмін для вологих частинок ускладнений масообміном, тому показники степені біля числа Рейнольдса є різними для сухих і вологих частинок подрібнених стебел соняшника.

Як було сказано вище, у подрібнених стеблах соняшника міститься незначна кількість вільної вологи. Основна волога є зв'язаною і міститься у клітинах та міжклітинному просторі і видаляється під час сушіння шляхом молекулярної дифузії. Тому були проведені експериментальні дослідження внутрішньодифузійних процесів спрямовані на визначення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії вологи з середини частинок матеріалу до їх поверхні за різних температур. Встановлено, що внаслідок подрібнення стебел соняшника частинки призматичної форми утворені із зовнішніх тканин, а кулястої – із внутрішніх. Тому, коефіцієнти ефективної молекулярної дифузії визначали окремо для призматичних і кулястих частинок подрібнених стебел соняшника.

Для частинок призматичної форми диференціальне рівняння молекулярної дифузії має вигляд:

$$\frac{\partial w^c(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = D_w^* \left[\frac{\partial^2 w^c(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w^c(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w^c(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], \quad (6)$$

з наступними обмеженнями $\tau > 0$, $w_{\kappa}^c \leq w^c \leq w_0^c$ та початковими і граничними умовами першого роду:

$$w^c(x, y, z, 0) = w_0^c = const. \quad (7)$$

$$w^c(\pm R_1, y, z, \tau) = w_{m.a}^c$$

$$w^c(x, \pm R_2, z, \tau) = w_{m.a}^c. \quad (8)$$

$$w^c(x, y, \pm R_3, \tau) = w_{m.a}^c$$

Розв'язок рівняння (6) у загальному вигляді можна представити у вигляді:

$$\frac{w^c(x, y, z, \tau) - w_{m.a}^c}{w_0^c - w_{m.a}^c} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp[-(\mu_n^2 K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_k^2 K_3^2) Fo]. \quad (9)$$

За великих значень τ у залежності (9) можна скористатись лише першим коренем характеристичного рівняння. Для визначення коефіцієнту ефективної внутрішньої дифузії залежність (9) логарифмували, а експериментальні дані кінетики фільтраційного сушіння представляли у вигляді функціональної залежності $\frac{\ln(\Delta w^c) - \ln(B_n B_m B_k)}{\mu^2(K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)} = f(\tau)$ (рис. 11). Аналізуючи рис. 11 видно, що

експериментальні дані можна апроксимувати прямою лінією і за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис можна визначати коефіцієнт ефективної внутрішньої дифузії вологи, представивши його у вигляді:

$$D_w^* = tg\alpha \cdot R^2 \quad (10)$$

Визначені значення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії із залежності (10) наведені у табл. 2. та на рис.12.

Таблиця 2

Залежність коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії від температури теплового агента

T, K	293	316	333	353	373
$D_w^* \cdot 10^8, m^2/c$	1,056	4,156	6,749	9,291	13,474

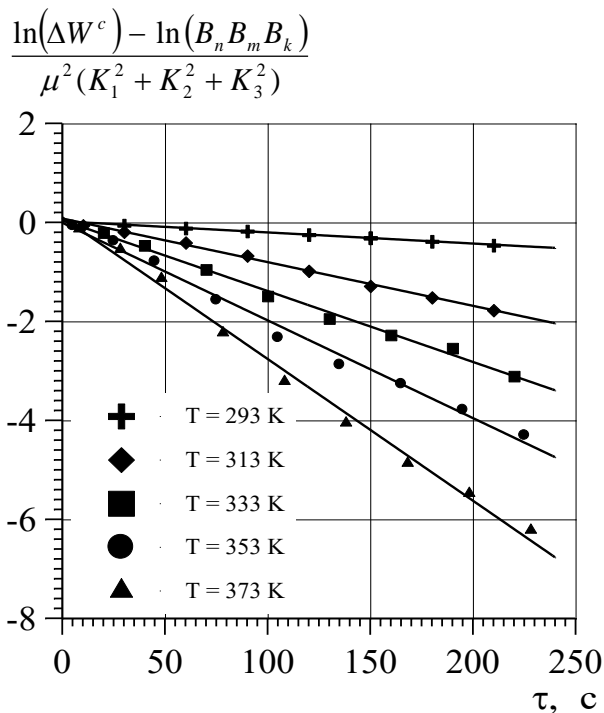


Рис. 11. Залежність величини $\frac{\ln(\Delta W^c) - \ln(B_n B_m B_k)}{\mu^2 (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)}$ від часу τ фільтраційного сушіння шару призматичних частинок за різних температур теплового агента

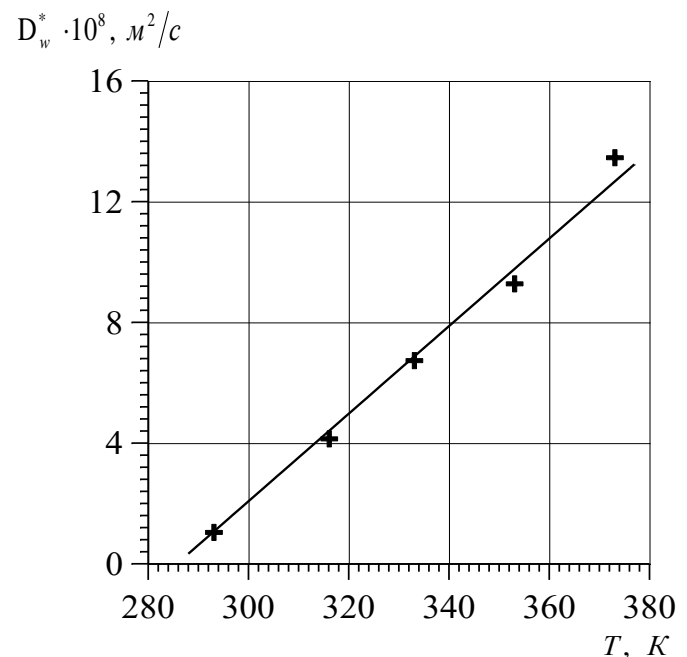


Рис. 12. Залежність коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії D_w^* від температури T теплового агента для частинок подрібнених стебел соняшника призматичної форми

Апроксимувавши отримані експериментально значення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії лінійною функцією отримали наступну розрахункову залежність:

$$D_w^* = D_w^{293} + 1,45 \cdot 10^{-9} \cdot (T - 293) \quad (11)$$

Максимальна похибка між експериментально отриманими даними та розрахованими на основі залежності (11) значеннями коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії вологи у тепловий агент в межах досліджуваних температур не перевищує 6,3%.

Для визначення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії із частинок кулястої форми використовували наступне диференціальне рівняння молекулярної дифузії:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w^* \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} \right), \quad (12)$$

Початкові та граничні умови першого роду в нашому випадку мають вигляд:

$$\begin{cases} w^c(r, \tau = 0) = w_0^c, & w^c(r = R, \tau) = w_{m.a.}^c, \\ \left(\frac{\partial w^c}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

З врахуванням крайових умов та накладених обмежень $\tau > 0, w_k^c \leq w^c \leq w_0^c$ розв'язок рівняння (12) має вигляд:

$$\frac{w^c - w_p^c}{w_0^c - w_p^c} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-u_n^2 \cdot Fo} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D_w^* \cdot \tau}{R^2}}, \quad (14)$$

За великих чисел Фур'є $Fo = D_w^* \cdot \tau / R^2$ (великі значення τ) членами суми $n > 1$ можна знехтувати, а прологарифмувавши рівняння (14) отримаємо залежність:

$$-\ln \left(\frac{w^c - w_p^c}{w_0^c - w_p^c} \right) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \pi^2 \cdot \frac{D_w^* \cdot \tau}{R^2}, \quad (15)$$

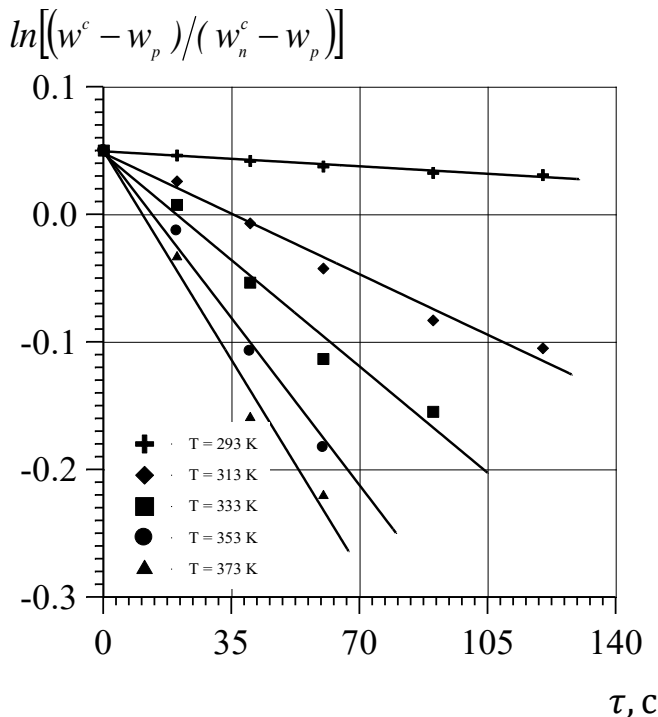


Рис. 13. Залежність $\ln \left[\frac{w^c - w_p^c}{w_0^c - w_p^c} \right]$ від часу τ фільтраційного сушіння шару призматичних частинок за різних температур теплового агенту

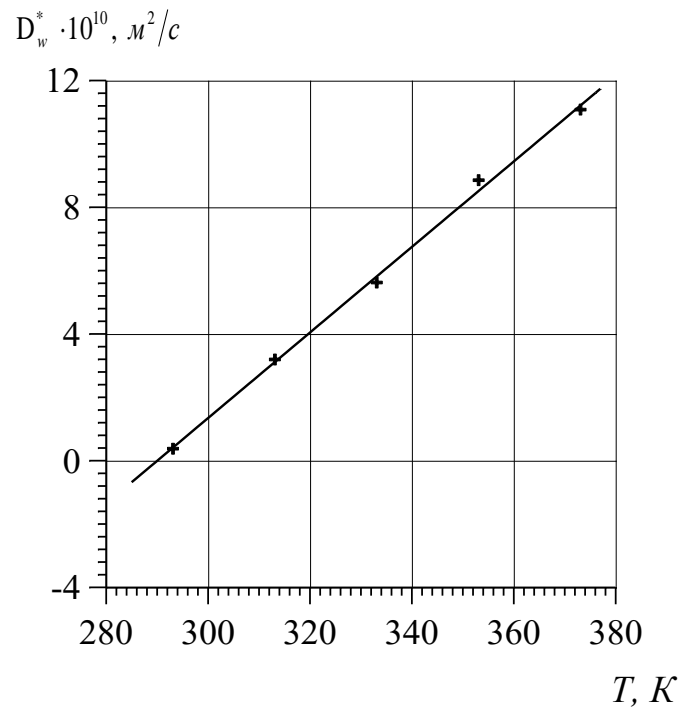


Рис. 14. Залежність коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії D_w^* від температури T теплового агенту для частинок подрібнених стебел соняшника кулястої форми.

Як бачимо з рис. 13, графічні залежності $\ln\left[\frac{(w^c - w_p)}{(w_n^c - w_p)}\right]$ мають лінійний характер і за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис можна визначити коефіцієнти ефективної внутрішньої дифузії D_w^* за різних температур теплового агента, тобто:

$$D_w^* = \frac{tg\alpha \cdot R^2}{\pi^2} \quad (16)$$

Визначені значення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії із залежності (16) наведені у табл. 3. і на рис. 14.

Таблиця 3.

Значення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії за різних температур теплового агента

T, K	293	316	333	353	373
$D_w \cdot 10^{10}, m^2/c$	0,396	3,211	5,641	8,872	11,103

Апроксимувавши експериментальні дані лінійною функцією отримали розрахункову залежність (17), яка дає змогу розраховувати значення коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії в межах досліджуваних температур для кулястих частинок подрібнених стебел соняшника.

$$D_w^* = D_w^{293} + 1,35 \cdot 10^{-11} \cdot (T - 293) \quad (17)$$

Максимальна похибка між експериментально отриманими даними та розрахованими на основі залежності (17) значеннями коефіцієнтів ефективної внутрішньої дифузії вологи у тепловий агент в межах досліджуваних температур не перевищує 8,4%.

Враховуючи співвідношення призматичних і кулястих частинок в масі подрібнених стебел соняшника, на основі розрахункових залежностей (11) і (17) можна прогнозувати динаміку видалення вологи під час їх фільтраційного сушіння. Це співвідношення залежить від товщини стебел соняшника, які в свою чергу залежать від сорту соняшника, середовища їх вирощування, погодних умов тощо.

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника наведені на рис. 15, 16, 17, на яких показано вплив на характер зміни вологовмісту у часі наступних параметрів: швидкості, температури теплового агента та висоти шару.

Аналіз рис. 15 показує, що з ростом температури тангенс кута нахилу прямолінійної ділянки кінетичних кривих зростає та скорочується час сушіння, це пояснюється зростанням сушильного потенціалу теплового агента, а також зростанням коефіцієнту ефективної внутрішньої дифузії вологи із подрібнених стебел соняшника. Відповідно збільшення швидкості фільтрування теплового агента від 0,66 до 1,68 м/с (рис. 16) скорочує час сушіння, що пояснюється зростанням коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агента до подрібнених стебел соняшника.

Як видно з рис. 17 за однакової швидкості і температури теплового агента тангенс кута нахилу прямолінійних ділянок кінетичних кривих залежить від висоти шару і з її ростом зменшується, це пояснюється тим, що з ростом висоти шару зростає шлях переміщення зони масообміну в напрямку до перфорованої перегородки.

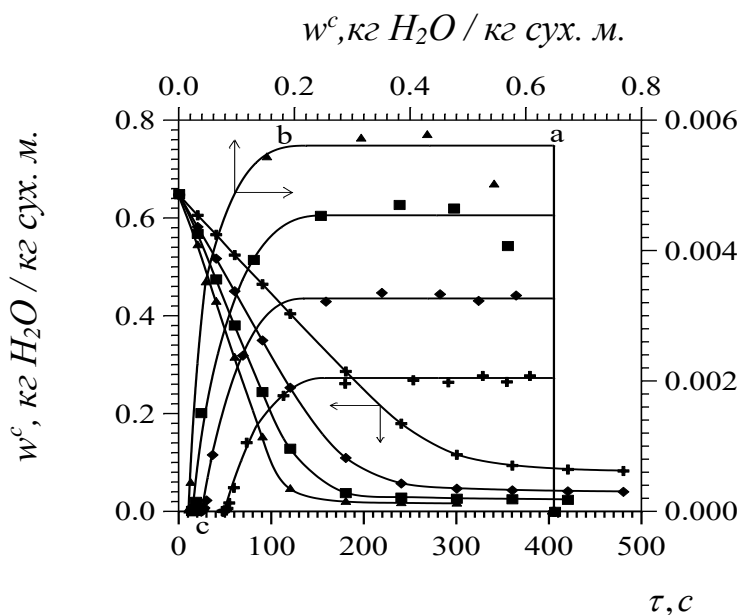


Рис. 15. Кінетика та швидкість сушіння біомаси соняшника за різної температури теплового агента.

+ T = 313 K
 ◆ T = 333 K
 ■ T = 353 K
 ▲ T = 373 K
 $v_0 = 1,66 \text{ м/с}; H = 0,09 \text{ м}$

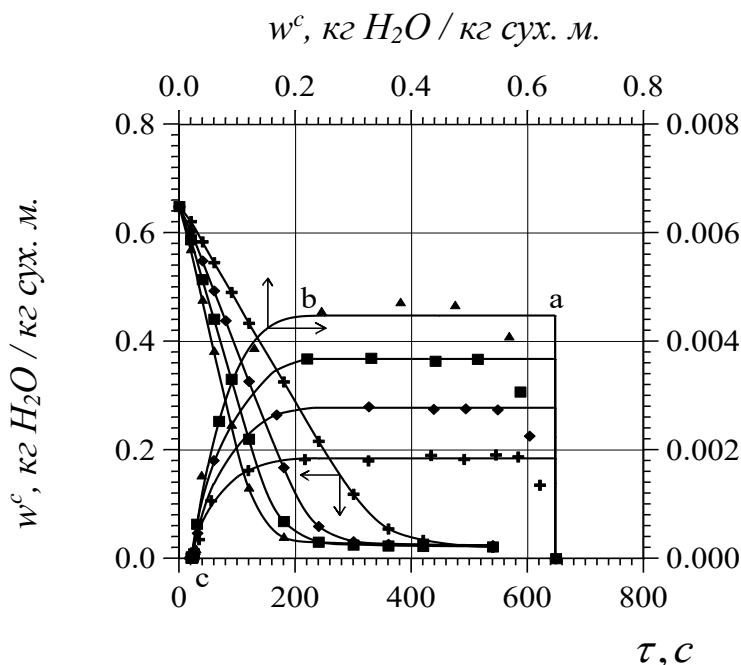


Рис. 16. Кінетика та швидкість сушіння біомаси соняшника за різної швидкості фільтрування теплового агента.

+ $v_0 = 0,66 \text{ м/с}$
 ◆ $v_0 = 0,99 \text{ м/с}$
 ■ $v_0 = 1,34 \text{ м/с}$
 ▲ $v_0 = 1,68 \text{ м/с}$
 $T = 353 \text{ K}; H = 0,09 \text{ м}$

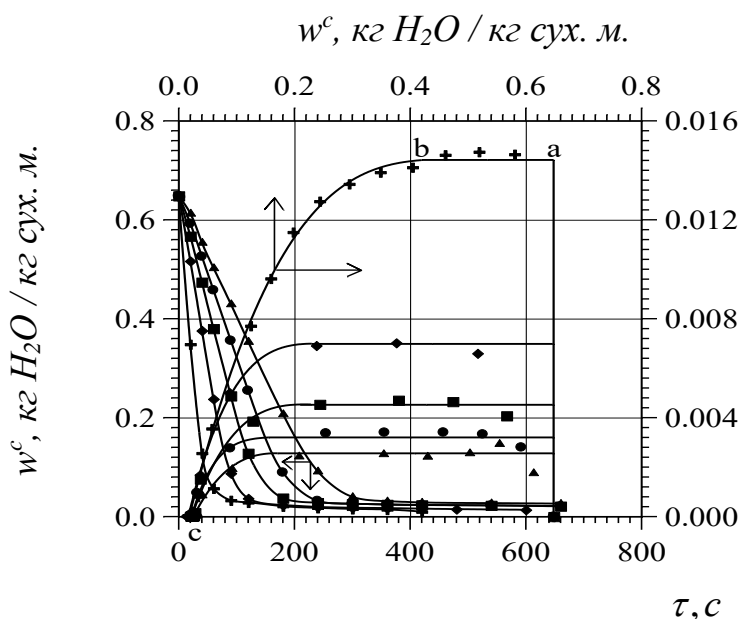


Рис. 17. Кінетика та швидкість сушіння біомаси соняшника за різних висот шару матеріалу.

+ H = 0,03 м
 ◆ H = 0,06 м
 ■ H = 0,09 м
 ● H = 0,12 м
 ▲ H = 0,16 м
 $T = 353 \text{ K}; v_0 = 1,66 \text{ м/с}$

Аналіз графічних залежностей швидкості сушіння (рис. 15 – 17), підтверджує наявність зонального механізму фільтраційного сушіння. Для усіх висот шару подрібнених стебел соняшника криві швидкості характеризуються наявністю кількох ділянок. Горизонтальна лінія (a-b) характеризує період повного насичення теплового агента вологою, тобто висота шару є достатньою для насичення теплового агента парами вологи. Як видно із рис. 17, довжина горизонтальної лінії залежить від висоти шару, тобто наявність періоду повного насичення теплового агента парами вологи та його тривалість визначається висотою шару вологого матеріалу та величиною рушійної сили процесу сушіння (різницею парціальних тисків водяної пари у теплому агенті і на поверхні частинок). З плином часу фронт масообміну переміщається в напрямку руху теплового агента і досягає перфорованої перегородки (точка b). Після досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки кількість вологого матеріалу є недостатньою для повного насичення теплового агента вологою, тому його насичення невпинно зменшується до досягнення рівноваги між дисперсним матеріалом і тепловим агентом або заданого кінцевого вологовмісту (лінія b-c). Характер зміни швидкості фільтраційного сушіння зображений на рис. 15-17 відповідає кінетиці процесу.

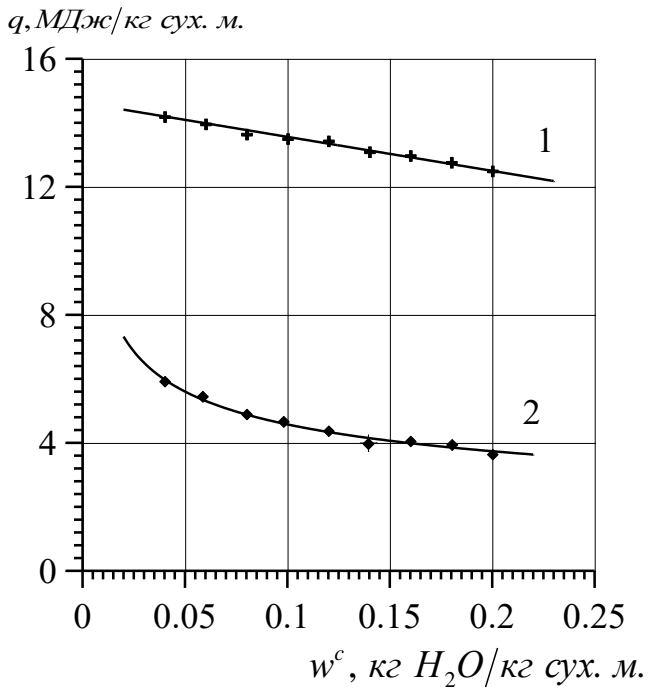
У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень фізико-механічних характеристик виготовленої дослідної партії брикетів з подрібнених стебел соняшника та підтверджено їх відповідність діючим стандартам. Наведена принципова схема установки фільтраційного сушіння та методика розрахунку її основних конструктивних розмірів. Експериментально досліджено залежність нижчої теплотворної здатності подрібнених стебел соняшника від їх кінцевого вологовмісту (табл. 4) та на її основі побудована графічна залежність (рис. 18, крива 1).

Таблиця 4.

Залежність нижчої теплотворної здатності подрібнених стебел соняшника від вологовмісту

Вологовміст <i>w^c, кг H₂O/кг сух. м.</i>	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12	0,1	0,08	0,06	0,04
Нижча теплотворна здатність <i>q, МДж/кг сух. м.</i>	12,5	12,77	12,98	13,1	13,44	13,51	13,65	13,97	14,2

Проведені розрахунки затрат енергії для висушування подрібнених стебел соняшника в межах зміни їх вологовмісту від 0,2 до 0,04 кг H₂O/кг сух. м., на основі яких побудовано графічну залежність (рис. 18, крива 2), з якої видно, що затрати на фільтраційне сушіння подрібнених стебел соняшника зростають, із зменшенням вологовмісту. Згідно отриманих кількісних значень затрат енергії на висушування подрібнених стебел соняшника проведено розрахунки для визначення корисної різниці $q_{\text{кор}}$ між затраченою енергією на сушіння подрібнених стебел соняшника та їх нижчою теплотворною здатністю залежно від їх вологовмісту, за результатами яких побудована графічна залежність, представлена на рис. 19.



1 – нижча теплотворна здатність

2 – затрати на фільтраційне сушіння

Рис. 18. Залежність нижчої теплотворної здатності і затрат теплоти на сушіння подрібнених стебел соняшника від вологовмісту

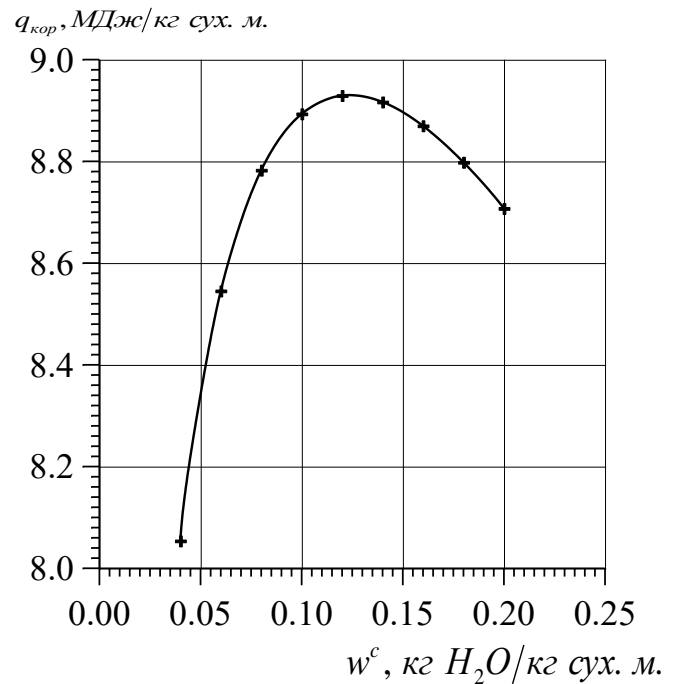


Рис. 19. Значення корисної різниці між нижчою теплотворною здатністю і затраченою енергією на сушіння за різного вологовмісту подрібнених стебел соняшника

На основі узагальнення отриманих результатів експериментальних досліджень та практичного досвіду підприємств з виробництва твердого біопалива кінцевий вологовмістом подрібнених стебел соняшника повинен становити $0,08 - 0,1 \text{ кг } H_2O/\text{кг сух. м.}$, при цьому корисна різниця між затратами на фільтраційне сушіння вологої сировини та калорійністю паливних брикетів становитиме в межах $q_{\text{кор.}} = 8,84 - 8,86 \text{ МДж/кг сух.м.}$ Проведено порівняльний аналіз фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника з сушінням в обертовому сушильному барабані та встановлено, що впровадження фільтраційного методу дасть змогу зменшити енергетичні затрати на процес висушування, із розрахунку на 1000 кг сухого матеріалу, на $847,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено вирішення науково-прикладного завдання фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника для виробництва твердого біопалива, зокрема гідромеханічних, теплових та внутрішньодифузійних масообмінних процесів, сукупність яких представляє нові науковообґрунтовані результати в галузі процесів та обладнання хімічної технології. Розроблено та обґрунтовано рекомендації та висновки, які дають змогу моделювати процес фільтраційного сушіння під час розроблення нового високоефективного енергозберігаючого обладнання для виробництва твердого біопалива з відходів рослинної сировини.

1. Процеси фільтраційного сушіння рослинної сировини, зокрема подрібнених стебел соняшника досліджені недостатньо, зокрема гідродинаміка, тепломасообмін, взаємозв'язок між тепловими і дифузійними явищами.

2. Визначено основні фізико-механічні характеристики шару подрібнених стебел соняшника, а саме: насипну густину $\rho_{\text{нас}} = 160 \text{ кг/м}^3$, уявну густину $\rho_{\text{уявн}} = 270 \text{ кг/м}^3$, істинну густину $\rho_{\text{іст}} = 895 \text{ кг/м}^3$, загальну пористість $\varepsilon_{\text{сум}} = 0,82 \text{ м}^3/\text{м}^3$, внутрішню пористість частинок $\varepsilon_{\text{вн}} = 0,42 \text{ м}^3/\text{м}^3$, порізність шару $\varepsilon_{\text{ш}} = 0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$, питому поверхню $a = 4200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ та еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент $d_e = 0,3763 \text{ мм}$.

3. Запропоновані рівняння в безрозмірній формі для опису гідродинаміки стаціонарного шару подрібнених стебел соняшника $Eu = 10,7 \cdot Re_e^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e}$ та

визначений коефіцієнт гідравлічного опору цього шару $\lambda = \frac{30}{Re_e^{0,7}} + 1$, які в достатній

мірі корелюються з теоретичними положеннями і дають змогу прогнозувати втрати тиску під час фільтраційного сушіння.

4. Отримано критеріальні залежності, які дають змогу визначати коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до стаціонарного шару сухих $Nu = 0,145 \cdot Re_e^{0,6} \cdot Pr^{0,33}$ та вологих $Nu = 0,14 \cdot Re_e^{0,9} \cdot Pr^{0,33}$ подрібнених стебел соняшника, а також коефіцієнтів масовіддачі $Sh = 0,145 \cdot Re_e^{0,6} \cdot Sc^{0,33}$ в межах зміни числа Рейнольдса $20 \leq Re_e \leq 120$ з достатньою для практичних розрахунків точністю.

5. На основі експериментального дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника за різних висот шару, швидкості фільтрування теплового агенту та температури встановлено, що раціональні параметри процесу, за яких затрати будуть найменшими ($H = 60 \text{ мм}$; $v_0 = 1,7 \text{ м/с}$; $T = 353 \text{ К}$).

6. Визначено залежність коефіцієнта ефективної внутрішньої дифузії вологи в навколишнє середовище від температури для зовнішніх $D_W^t = D_W^{293} + 1,45 \cdot 10^{-9} (T - 293)$ та внутрішніх тканин стебел соняшника $D_W^t = D_W^{293} + 1,35 \cdot 10^{-11} (T - 293)$ в межах зміни температури теплового агенту $293 \leq T \leq 373 \text{ К}$.

7. Встановлено, що оптимальний кінцевий вологовміст подрібнених стебел соняшника повинен становити $0,08 - 0,1 \text{ кг } H_2O / \text{кг сух. м.}$, при цьому корисна різниця між затратами на фільтраційне сушіння вологої сировини та калорійністю паливних брикетів становитиме приблизно $q_{\text{кор.}} = 8,84 - 8,86 \text{ МДж/кг сух. м.}$

8. Виготовлено експериментальну партію паливних брикетів та визначено їх основні фізико-механічні характеристики, а саме: щільність брикетів – 890 кг/м^3 ; міцність брикетів на згинання – $3,8 \text{ МПа}$, на стирання – $91,7 \%$ та на скидання становить $92,1 \%$, що відповідає вимогам ДСТУ EN 15234-2:2013.

9. Проведено порівняльний аналіз ефективності висушування подрібнених стебел соняшника фільтраційним методом та сушінням в обертовому сушильному

барабані. Встановлено, що використання установки фільтраційного сушіння дасть змогу зекономити 847,5 кВт год на 1000 кг паливних брикетів.

10. Розроблена принципова схема установки фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника, яка захищена патентом України №115284 на корисну модель та розроблено методику її розрахунку.

Основні умовні позначення

d_e – еквівалентний діаметр каналів між частинками, м; d_c – діаметр частинки, м; $\rho_{нас}$, $\rho_{уявн}$, $\rho_{іст}$, – насипна, уявна, істинна густина подрібнених стебел соняшника відповідно, $кг/м^3$; $\varepsilon_{сум}$, $\varepsilon_{вн}$ – сумарна та внутрішня пористість подрібнених стебел соняшника, $м^3/м^3$; $\varepsilon_{ш}$ – порізність шару подрібнених стебел соняшника, $м^3/м^3$; a – питома поверхня подрібнених стебел соняшника, $м^2/м^3$; ΔP – втрати тиску, Па; U_o , U – відповідно фіктивна і дійсна швидкість, м/с; H – висота шару, м; λ – коефіцієнт опору; H_e – еквівалентна довжина каналу, м; α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(м^2 \cdot K)$; w^c – середній вологовміст подрібнених стебел соняшника, $кг H_2O/кг сух. мат.$; r – біжучий радіус, м; T – температура теплового агента, К; D_w^* – коефіцієнт ефективної внутрішньої дифузії, $м^2/с$; G – маса вологи, кг; R , r – середні радіуси частинок подрібнених стебел соняшника і біжучий радіус відповідно ($0 < r \leq R$), м; τ – час, с; ρ – густина теплового агента, $кг/м^3$; R_1 , R_2 , R_3 – узагальнений розмір частинки подрібнених стебел соняшника, м; μ_n , μ_m , μ_k – корені характеристичного рівняння; **Безрозмірні комплекси:** $Eu = \Delta P / (\rho \cdot v^2)$ – число Ейлера; $Fo = D_w^* \cdot \tau / R^2$ – число Фур'є; $Nu = \alpha \cdot d_e / \lambda$ – число Нусельта; $Pr = \nu / a$ – число Прандтля; $Re_e = v \cdot d_e \cdot \rho / \mu$ – число Рейнольдса; **Індекси:** *нижній:* *min* – мінімальний; *T* – теоретичний; *e* – еквівалентний; *вх.*, *вих.*, *м. т.* – вхідна, вихідна, мокрого термометра; *та* – тепловий агент; *п*, *р* – початковий та рівноважний стан відповідно; *нас* – насичення; **верхній:** *с* – по відношенню до маси сухого матеріалу.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Атаманюк В.М. Дослідження перспективи фільтраційного сушіння стебел соняшника для виробництва твердого біопалива / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., **Госовський Р.Р.** // Збірник наукових праць ОНАХТ Випуск 41 Том 2 – 2012. – с. 81-88.

Особистий внесок дисертанта: проведення аналізу джерел літератури, проведення експериментів та написання статті.

2. Атаманюк В.М. Розрахунок коефіцієнта гідравлічного опору під час руху теплового агента крізь стаціонарний шар подрібнених стебел соняшника / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., **Госовський Р.Р.** // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету №22.9, – 2012. – С. 112-118.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, написання статті та подання до друку.

3. Кіндзера Д.П. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик / Кіндзера Д.П.,

Атаманюк В.М., **Госовський Р.Р.**, Мотіль І.М. // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету, №23.17, – 2013. – С. 138-146.

Особистий внесок дисертанта: формування паливних брикетів, експериментальне визначення фізико-механічних характеристик та узагальнення отриманих результатів.

4. Кіндзера Д.П. Визначення оптимальних параметрів сушіння подрібнених стебел соняшника для виробництва паливних брикетів / Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., **Госовський Р.Р.** // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій, №47, Том 2. - 2015. - С. 194-198.

Особистий внесок дисертанта: дослідження параметрів сушіння, проведення узагальнень.

5. Кіндзера Д.П. Зменшення енергозатрат процесу виробництва твердого біопалива та підвищення якісних показників продукції / Кіндзера Д.П., Пелех М.П., **Госовський Р.Р.**, Кіндзера А.Р. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» № 841 – Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2016. – С. 302-307.

Особистий внесок дисертанта: проведення розрахунків енергозатрат, підготовка статті до друку.

6. Кіндзера Д.П. Кінетика фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника / Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., **Госовський Р.Р.** // Наукові праці. Одеська національна академія харчових технологій, Том 80. №1, – 2016. – С. 32 – 37.

Особистий внесок дисертанта: обробка експериментів, побудова кінетичних залежностей, написання статті.

7. **Hosovskyi R.** Diffusive mass transfer during drying of grinder sunflower stalks / Roman Hosovskyi, Diana Kindzera, Volodymyr Atamanyuk // Chemistry & Chemical Technology. – 2016. – Vol.10, №4. – P. 194-198. (*Scopus*).

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, підготовка первинного варіанту статті.

8. **Госовський Р.Р.** Внутрішньодифузійне масоперенесення під час фільтраційного сушіння перанхімної тканини стебел соняшника / Госовський Р.Р., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету, №27.6, – 2017. – С. 112-116. (*Index Copernicus*).

9. Атаманюк В.М. Сушіння подрібнених стебел соняшника в умовах фільтрації теплоносія / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., **Госовський Р.Р.** // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя «Сучасні технології та обладнання харчових виробництв», Тернопіль – 29-30 вересня 2011. – С. 188.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, їх обробка і узагальнення.

10. **Госовський Р.Р.** Використання фільтраційного методу для зневоднення подрібнених стебел соняшника / Госовський Р.Р., Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П. // 2-й Міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів – 19 – 22 вересня 2012. – С. 103.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.

11. **Госовський Р.Р.** Фільтраційне сушіння рослинної сировини як енергозберігаюча стадія технології виробництва біопалива / Госовський Р.Р., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. // II Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція «Сучасні технології в промисловому виробництві», Суми, 17-20 квітня 2012. – С. 114.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, постановка задачі, підготовка матеріалів до публікації.

12. **Госовський Р.Р.** Дослідження тепломасообміну у процесі фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника / Госовський Р.Р., Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П. // 3-й Міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, 17 – 19 вересня 2014. – С. 81.

Особистий внесок дисертанта: підбір методики та проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації.

13. **Госовський Р.Р.** Фільтраційне сушіння подрібнених стебел соняшника / Госовський Р.Р., Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П. // Actual problems of chemistry and technology of organic substances APCTOS2 Ukraine, Lviv, – November 5-7, 2015. – P.111.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, аналіз та узагальнення експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації.

14. Кіндзера Д.П. Оптимальні параметри фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника для виробництва твердого біопалива / Кіндзера Д.П., **Госовський Р.Р.**, Атаманюк В.М., Цимбалістий О.В. // 4-й міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, – 21 – 23 вересня 2016. – С. 100.

15. D. Kindzera diffusive transfer during filtration drying of sunflower stalks / D. Kindzera, V. Atamanyuk, **R. Gosovkiy**, I. Lishchynska // 6th International youth science forum «Litteris et artibus». Lviv, Ukraine. – November 24-26, 2016. – P. 374-376.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, постановка задачі, підготовка матеріалів до публікації.

16. **Госовський Р.Р.** Дослідження процесу фільтраційного сушіння біомаси соняшника з метою створення нового сушильного обладнання / **Госовський Р.Р.**, Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Микитчак Б.М. // Міжнародна науково-практична конференція «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості». Київ. – 8-10 листопада 2016. – С. 48-49.

Особистий внесок дисертанта: планування і проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.

17. Кіндзера Д.П. Зменшення енергозатрат технологічної лінії виробництва твердого палива з біомаси соняшника / Кіндзера Д.П., **Госовський Р.Р.**, Атаманюк В.М. // Семінар. Сталый розвиток – погляд у майбутнє. Збірник матеріалів. Львів, – 15 вересня 2017. – С. 38.

Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обробка отриманих результатів, підготовка матеріалів до публікації.

18. Пат. 115284 Україна, МПК F26B 3/06 (2006.01). Установка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., **Госовський Р.Р.**, Гузьова І.О., Микичак Б.М. // заявник і власник патенту – Національний університет “Львівська політехніка”. – №u201610806; заявл. 27.10.2016 опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7.

АНОТАЦІЯ

Госовський Р.Р. Закономірності фільтраційного сушіння органічної сировини для виготовлення альтернативного палива. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології (161 - Хімічна технологія та інженерія). - Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2018.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню основних закономірностей фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника, зокрема, гідродинаміки, тепломасообміну, внутрішньодифузійних процесів перенесення вологи та кінетики зневоднення для подальшого брикетування та отриманням альтернативного палива. Визначено основні фізико-механічні характеристики шару подрібнених стебел соняшника, а саме: насипну, уявну, істинну густини; загальну пористість, внутрішню пористість частинок, порізність шару; питому поверхню; еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент. На основі узагальнення результатів досліджень, запропоновано рівняння в безрозмірній формі для опису гідродинаміки стаціонарного шару подрібнених стебел соняшника, а також визначений коефіцієнт гідравлічного опору цього шару, що дає змогу прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння використовуючи рівняння Дарсі-Вейсбаха. Отримано критеріальні рівняння, які дають змогу визначати коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до стаціонарного шару сухих та вологих подрібнених стебел соняшника, а також коефіцієнти масовіддачі. Встановлено залежність коефіцієнта ефективної внутрішньої дифузії вологи в навколишнє середовище від температури для зовнішніх та внутрішніх тканин подрібнених стебел соняшника. На основі експериментального дослідження кінетики фільтраційного сушіння подрібнених стебел соняшника за різних висот шару, швидкості фільтрування та температури теплового агенту встановлено раціональні параметри процесу, за яких затрати на висушування будуть найменшими. Визначено оптимальний кінцевий вологовміст подрібнених стебел соняшника за якого корисна різниця між затратами на фільтраційне сушіння вологої сировини та калорійністю паливних брикетів становитиме приблизно 8,84 – 8,86 МДж/кг сух.м. Основні фізико-механічні характеристики експериментальної партії паливних брикетів з подрібнених стебел соняшника а саме: щільність, міцність на згинання, стирання та скидання відповідають вимогам ДСТУ EN 15234-2:2013 Порівняльний аналіз ефективностей висушування подрібнених стебел соняшника фільтраційним методом та сушінням в обертовому сушильному барабані показав, що використання установки фільтраційного сушіння дасть змогу зекономити 847,5 кВт год на 1000 кг паливних брикетів. Розроблена принципова схема установки фільтраційного сушіння

подрібнених стебел соняшника, яка захищена патентом України №115284 на корисну модель та розроблено методику її розрахунку.

Ключові слова: фільтраційне сушіння, органічна сировина, стаціонарний шар, гідродинаміка, тепломасообмін, внутрішньодифузійні процеси, кінетика, альтернативне паливо, паливні брикети.

ABSTRACT

Hosovski R.R. The regularities of the filtration drying of organic raw materials for the production of alternative fuels. - On the rights of manuscript.

The dissertation for Philosophy Doctor (eng.) degree on specialty 05.17.08 - Processes and equipment of chemical technology (161 - Chemical technology and engineering). - Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the research of the filtration drying basic regularities of the crushed sunflower stems, in particular, hydrodynamics, heat transfer, internal diffusion processes of moisture transfer and kinetics of dehydration for further briquetting and obtaining alternative fuel. The analysis of available literature sources showed that the processes of heat and mass transfer during the filtration drying of organic raw materials were insufficiently studied, therefore, experimental and theoretical studies of organic materials drying are actual problems.

The basic physical and mechanical characteristics of a layer of crushed sunflower stems are determined, such as: bulk, apparent, true densities; total porosity, internal porosity of particles, porosity of the layer; specific surface area; the equivalent diameter of the channels through which the thermal agent is filtered. On the basis of the generalization of the research results, the equation in the dimensionless form for the description of the hydrodynamics of the stationary layer of crushed sunflower stems has been proposed, as well as the hydraulic resistance coefficient of this layer has been determined, which allows to predict the energy costs for the filtration drying process using the Darcy-Weisbach equation.

Criterion equations have been obtained to determine the coefficients of the heat transfer from the thermal agent to the stationary layer of dry and wet crushed sunflower stems, as well as the coefficients of the mass transfer. The process of diffusive mass transfer during crushed sunflower stems drying of prismatic and round shapes particles has been mathematically described. The temperature effect on effective internal diffusion coefficient has been examined for external and internal tissues of crushed sunflower stems. The deduced equations allow to calculate theoretically the effective diffusion coefficients for the crushed sunflower stems within temperature range of 293–373 K. On the basis of the experimental study of the kinetics of the filtration drying of crushed sunflower stems at different heights of the layer, the filtration rate and the temperature of the heat agent, rational parameters of the process have been determined in view of reducing energy costs for drying and obtaining the high quality raw material for the alternative fuel production. The optimum final moisture content of crushed sunflower stems has been determined in view of the maximum difference between the costs of the filtration drying of raw materials and the calorificity of fuel briquettes. The basic physical and mechanical characteristics of the fuel briquettes experimental batch such as density and strength are complying with the

requirements of DSTU EN 15234-2:2013. A comparative analysis of drying effectiveness by filtration method and by drying in rotary drying drum has shown that the use of a filtration drying plant will save 847,5 kWh per 1000 kg of fuel briquettes.

The recommendations and conclusions that allow to simulate the process of the filtration drying during to develop of the new high-efficiency energy saving equipment for the production of solid biofuels from sunflower waste have been developed and substantiated. The scheme of the filtration drying installation for crushed sunflower stems has been protected by the patent of Ukraine №115284.

Keywords: filtration drying, organic material, stationary layer, hydrodynamics, heat transfer, intradiffusion processes, kinetics, alternative fuel, fuel briquettes.