

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ЦЮРА Надія Ярославівна

УДК 66.047.75+539.215

**СУМІСНИЙ ПРОЦЕС ФІЛЬТРУВАННЯ ТА СУШІННЯ
ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

спеціальність 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, м. Львів.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Ханик Ярослав Миколайович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Соколовський Ярослав Іванович
Національний лісотехнічний університет України
професор кафедри інформаційних технологій

кандидат технічних наук

Новохат Олег Анатолійович

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського", доцент кафедри машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних виробництв

Захист відбудеться “11” травня 2021 року о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.09 при Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів – 13, пл. Св. Юра 9, корпус 9, ауд. 214.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: (79013, м. Львів – 13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “9” квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор

Гумницький Я.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Вдосконалення сушильного обладнання має важливе значення для хімічної та інших галузей промисловості, адже вагомий вплив на якість та вартість продукції має саме спосіб реалізації цього складного тепломасообмінного процесу. Відомо, що на здійснення процесу сушіння зазвичай витрачається втричі більше енергії, ніж на фізичне перетворення вологи в пару, що вказує на недосконалість сучасного обладнання. У випадку сушіння дисперсних матеріалів перспективним є фільтраційний метод, який має низку переваг перед іншими з огляду на його ефективність та енергоощадність. Фільтраційне сушіння здійснюється шляхом профільтрування теплового агенту крізь пористу структуру стаціонарного шару матеріалу та характеризується високими коефіцієнтами тепло- та масообміну, розвиненою поверхнею тепломасопередачі та рівномірним видаленням вологи, тобто забезпечує належну якість та невисоку собівартість продукції.

В напрямку забезпечення економного споживання енергетичних та сировинних ресурсів проведені теоретичні й експериментальні дослідження процесу фільтраційного сушіння відходів виробництва пігментного Ti(IV) оксиду - Fe(II) сульфат гептагідрату та відпрацьованого деревного борошна з метою їх подальшої утилізації, а також супутнього продукту даного виробництва залізоокисного пігменту α -FeO(OH), сировиною для якого є Fe(II) сульфат гептагідрат. Дослідження закономірностей фільтраційного процесу сушіння цих матеріалів із метою встановлення науково обґрунтованих технологічних параметрів та проектування відповідного обладнання дасть змогу зменшити навантаження на доквілля та вдосконалити технології відповідних виробництв. Зневоднений Fe(II) сульфат гептагідрат застосовують у виробництвах залізоокисних пігментів, феромагнетиків, цементів тощо. Беручи до уваги теплоізоляційні властивості деревного борошна, висушені відходи зі стадії «чорної фільтрації» виробництва пігментного Ti(IV) оксиду успішно використовують у промисловості будівельних матеріалів. Доцільність застосування фільтраційного сушіння для зневоднення жовтого залізоокисного пігменту α -FeO(OH) перед його прожарюванням задля отримання червоного залізоокисного пігменту (α -Fe₂O₃) пояснюється досягненням у такий спосіб однорідності кольору. На сьогодні відсутні дані про застосування фільтраційного сушіння для досліджуваних матеріалів, а у випадку Fe(II) сульфат гептагідрату особливий науковий інтерес представляє постадійне видалення кристалізаційної вологи.

З огляду джерел інформації зроблений висновок про доцільність теоретичних і експериментальних досліджень процесу фільтраційного способу дегідратації Fe(II) сульфат гептагідрату, а також сушіння

залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна, що є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота згідно з планами кафедри хімічної інженерії Національного університету “Львівська політехніка” в межах науково-дослідної роботи відповідно до 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 встановлення основних закономірностей гідродинаміки, кінетики та динаміки сушіння шляхом профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсних матеріалів, створення нового вискоефективного обладнання для реалізації фільтраційного методу сушіння в цілях зменшення енергетичних затрат на процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Експериментально встановити фізико-механічні властивості стаціонарного шару відходів виробництва пігментного $Ti(IV)$ оксиду - $Fe(II)$ сульфат гептагідрату та відпрацьованого деревного борошна, а також супутнього продукту - залізоокисного пігменту.

2. Дослідити гідродинаміку під час фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар $Fe(II)$ сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту за різних висот і швидкостей руху теплового агенту та узагальнити отримані результати у вигляді безрозмірних комплексів.

3. Експериментально визначити коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до стаціонарного шару $Fe(II)$ сульфат гептагідрату та узагальнити отримані результати у вигляді безрозмірних комплексів.

4. Експериментально дослідити вплив кінетики та динаміки фільтраційного сушіння на процес дегідратації $Fe(II)$ сульфат гептагідрату до тетрагідрату та на зневоднення відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

5. Розробити принципову схему установки фільтраційного сушіння та методу її розрахунку.

Наукова новизна. Опираючись на результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу дегідратації $Fe(II)$ сульфат гептагідрату до тетрагідрату та сушіння відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту фільтраційним способом у дисертаційній роботі вперше:

- отримані критеріальні залежності для визначення числа Ейлера та визначені коефіцієнти гідравлічного тертя в стаціонарному шарі

досліджуваних матеріалів; запропонована критеріальна залежність для визначення числа Лейбензона для встановлення гідравлічного опору шару Fe(II) сульфат гептагідрату, що свідчить про подальший розвиток теоретичних аспектів гідродинаміки стаціонарного шару дисперсних матеріалів у умовах внутрішньої та зовнішньої задачі;

- визначені коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до кристалів Fe (II) сульфат гептагідрату та отримані критеріальні залежності, які дають змогу прогнозувати процес теплообміну під час фільтраційного сушіння;
- досліджений вплив висоти стаціонарного шару Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, а також температури теплового агенту й швидкості фільтрування на інтенсивність фільтраційного сушіння та запропоновані розрахункові залежності для прогнозування процесу висушування вказаних матеріалів.
- розроблена методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів. Критеріальні залежності, отримані шляхом узагальнення теоретичних й експериментальних результатів досліджень гідродинаміки та теплообміну процесу дегідратації Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту під час фільтраційного сушіння в стаціонарному шарі, дають змогу прогнозувати інтенсивність процесу, обирати параметри теплового агенту для забезпечення економічної доцільності на етапі проектування сушильного обладнання. Розроблена принципова схема сушильної установки, яка захищена патентом України на винахід, та методика розрахунку її основних конструктивних розмірів, що має на меті підвищити економічні показники титанового виробництва, синтезу пігментів на основі заліза та забезпечити утилізацію побічних продуктів та відходів. Практична реалізація отриманих результатів дисертаційної роботи полягає у передачі результатів досліджень ДП «Аргентум» та ТзОВ «Галвесттрейд» для впровадження у виробництво технології фільтраційного сушіння. Теоретичні та технологічні положення, методики розрахунку фільтраційної сушарки та математичні залежності, використані в навчальному процесі під час викладання дисципліни “Процеси та апарати хімічних виробництв”, а також під час курсового та дипломного проектування для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» Національного університету «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні критичного огляду джерел інформації щодо проблеми сушіння дисперсних матеріалів; у самостійній розробці, підборі та апробації методик досліджень гідродинаміки, тепломасообміну, кінетики та динаміки фільтраційного сушіння Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й

залізоокисного пігменту; у проведенні експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів й узагальненні отриманих дослідних даних; у підготовці матеріалів до публікації та виступах на конференціях; у розробленні принципової схеми установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів та оформленні патенту.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на IV науково-технічній конференції «Поступ у нафтопереробній та нафтохімічній промисловості» (м. Львів, 2007 р.); науково-практичній конференції «Хімічна та екологічна освіта: стан і перспективи розвитку» (м. Вінниця, 2008 р.); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2011 р.); XXX, XXXII наукових конференціях «Львівські хімічні читання» (м. Львів, 2011 та 2013 р.р.); Сучасні проблеми науки і технологій в умовах забезпечення сталого розвитку економіки: «MPST-I-2015» (м. Миргород, 2015 р.); V міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (м. Одеса, 2015 р.); Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин (Львів, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (м. Київ, 2016 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (м. Львів, 2018 р.); *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique* (Франція, Париж, 2021р.).

Публікації. Основні положення та результати роботи відображені у 14 наукових працях, з яких 5 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному виданні, 7 тез доповідей на міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, а також 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який охоплює 160 найменувань, і додатків. Роботу викладено на 151 сторінці основного тексту, містить 69 рисунків, 15 таблиць та додатки на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й завдання наукових досліджень, наукова новизна й практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі наведений критичний аналіз методів сушіння, а також огляд науково-технічної літератури щодо гідродинаміки фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар дисперсних матеріалів та тепломасообміну під час фільтраційного сушіння, що дало

змогу сформулювати основні напрями та завдання теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі обґрунтований вибір об'єктів досліджень та представлена доцільність застосування фільтраційного методу сушіння для дегідратації Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту; наведені основні фізико-хімічні характеристики Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, представлені схеми експериментальних установок та методики встановлення основних параметрів стаціонарного шару досліджуваних матеріалів, дослідження гідродинаміки, теплообміну та кінетики фільтраційного сушіння, а також оцінки похибок вимірювання.

У третьому розділі наведені основні параметри стаціонарного шару Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, які визначені експериментально і мають вплив на гідродинаміку процесу фільтраційного сушіння, а також результати дослідження гідродинаміки під час фільтрування газового потоку крізь пористий шар вказаних матеріалів. Показано, що гідравлічний опір шару досліджуваних матеріалів обумовлений в'язкісною та інерційною складовими, проте є достатньо низьким, що дає змогу успішно застосовувати фільтраційне сушіння. На рис. 1 наведені залежності втрат тиску від фіктивної швидкості в стаціонарному шарі Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

Узагальнення експериментальних даних проведені кількома способами, в результаті чого отримані розрахункові залежності, які дають змогу спрогнозувати втрати тиску на профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваних матеріалів. Шляхом встановлення залежності числа Ейлера від числа Рейнольдса для відповідних висот шару кожного матеріалу побудовані криві $Eu = f(Re_e)$ (рис. 2), розміщення яких свідчить про залежність останніх від висоти шару в кожному випадку (а, б, в).

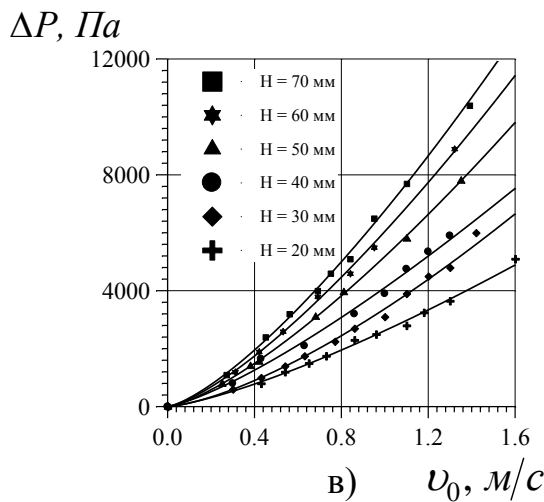
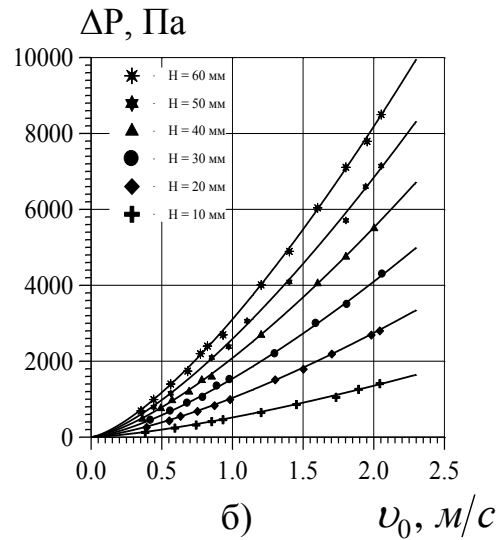
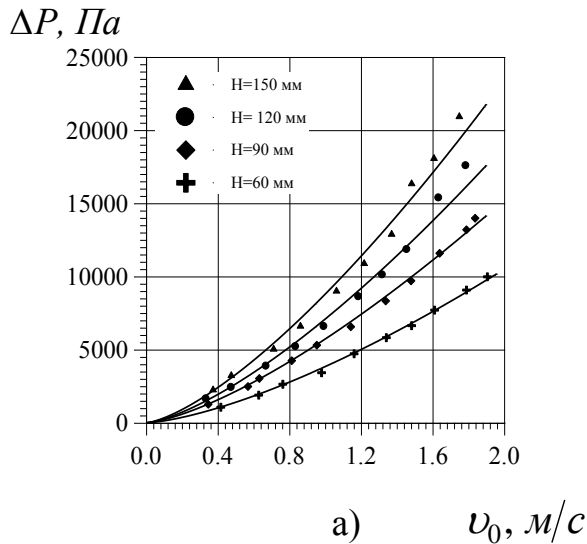
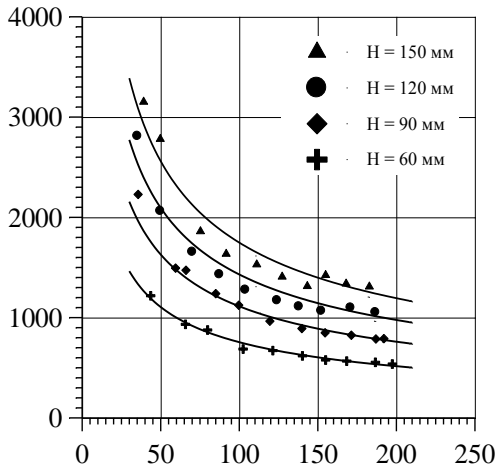


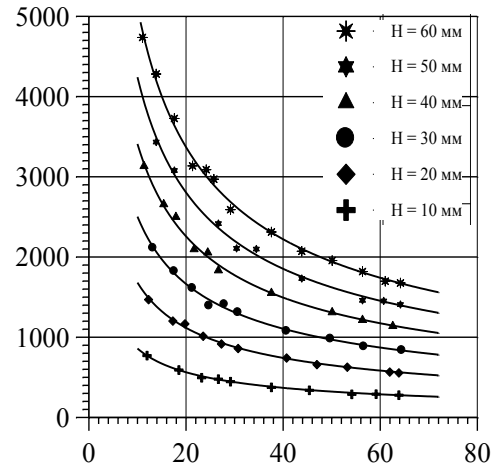
Рис. 1. Залежність втрат тиску ΔP від фіктивної швидкості u_0 в стаціонарному шарі, висотою H :

- а) Fe(II) сульфат гептагідрат;
- б) залізоокисний пігмент;
- в) відпрацьоване деревне борошно

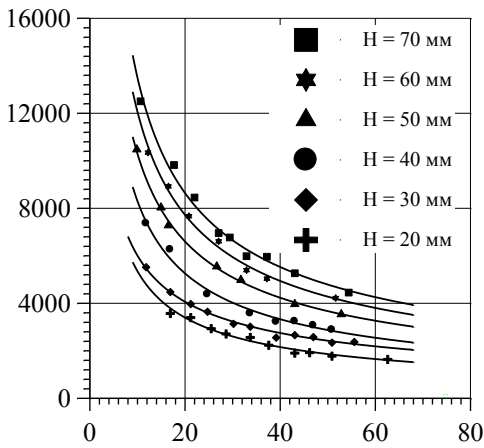
Апроксимація експериментальних даних степеневими функціями дала змогу представити втрати тиску в стаціонарному шарі у вигляді розрахункової залежності $Eu = A \cdot Re^n$, де значення коефіцієнта “А” і показника степені n знайдені шляхом узагальнення результатів експериментальних досліджень, наведених на рис. 1. Встановлено, що “А” залежить від геометричного симплексу $\Gamma = H/d_p$, що характеризує співвідношення висоти шару до еквівалентного діаметру частинки матеріалу, тож шляхом апроксимації кривої $A = f(H/d_p)$ отримані залежності для визначення коефіцієнтів “А” для обраних матеріалів. Шляхом математичних перетворень отримані розрахункові залежності для визначення чисел Ейлера, які представлені в табл. 1. Представивши дослідні дані (рис.1) у вигляді графічних залежностей $\lambda = f(Re_e)$ і апроксимувавши останні степеневою функцією, отримані розрахункові рівняння, які наведені у табл.1. Залежність коефіцієнтів гідравлічного тертя λ як функції Рейнольдса визначені експериментальним шляхом для досліджуваних матеріалів.

Eu 

а)

 Re_e Eu 

б)

 Re_e Eu 

в)

 Re_e

Рис. 2. Залежність числа Ейлера $Eu_{з\text{овн}}$ від числа Рейнольдса Re_e для стаціонарного шару різної висоти H :

- а) Fe(II) сульфат гептагідрат;
 б) залізоокисний пігмент;
 в) відпрацьоване деревне борошно

Таблиця 1

Залежності для визначення втрат тиску

Fe(II) сульфат Гептагідрат	$Eu_{з\text{овн}} = 155 \cdot Re_e^{-0,55} \cdot \frac{H}{d_{\text{ч}}}$	$\lambda = \frac{160}{Re_e} + 2,2$
Залізоокисний Пігмент	$Eu_{з\text{овн}} = 170 \cdot Re_e^{-0,6} \cdot \frac{H}{d_{\text{ч}}}$	$\lambda = \frac{760}{Re_e} + 15$
Деревне Борошно	$Eu_{з\text{овн}} = 165 \cdot Re_e^{-0,65} \cdot \left(\frac{H}{d_{\text{ч}}}\right)^{0,75}$	$\lambda = \frac{190}{Re_e} + 2$

Розраховані на основі табл. 1 втрати тиску добре узгоджуються із експериментальними значеннями, а максимальна відносна похибка не перевищує 11% для Fe(II) сульфат гептагідрату ($18 \leq Re_e \leq 100$), 10% для залізоокисного пігменту ($12 \leq Re_e \leq 75$) та 10,6% для відпрацьованого

деревного борошна ($8 \leq Re_e \leq 70$), що є прийнятним для проектних розрахунків технологічного обладнання.

Узагальнення експериментальних даних гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь шар Fe(II) сульфат гептагідрату також проводили, вивчаючи внутрішню задачу, де визначальним розміром є еквівалентний діаметр каналів між частиками шару. Отримана розрахункова залежність:

$$Eu_{\text{вн}} = 29 \cdot Re_e^{-0,6} \cdot \frac{H_e}{d_e}, \quad (1)$$

яка добре корелюється з експериментальними даними (похибка не перевищує 10%, $20 \leq Re_e \leq 100$). Задовільний результат отриманий і під час узагальнення критеріальним рівнянням Лейбензона (максимальне відхилення 11% для $20 \leq Re_e \leq 100$):

$$\Omega = 27 \cdot Re_e^{1,42}. \quad (2)$$

У четвертому розділі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Оскільки Fe(II) сульфат гептагідрат містить кристалізаційну вологу, попередньо проведений термічний аналіз зразків даного матеріалу з метою встановлення механізму постадійного відщеплення молекул води та задля розрахунку теплового ефекту плавлення та дегідратації і встановлення оптимальних температурних режимів процесу фільтраційного сушіння. Обґрунтований вибір температури $335 \pm 0,5$ К для дегідратації Fe(II) сульфат гептагідрату до утворення Fe(II) сульфат тетрагідрату. За вищих температур спостерігається явище плавлення Fe(II) сульфату у власній кристалізаційній воді, що супроводжується ендоефектом. Проведені дослідження процесу теплообміну між тепловим агентом та частинками Fe(II) сульфат тетрагідрату з метою визначення коефіцієнтів тепловіддачі. Процес сушіння здійснювали в «короткому шарі» ($H=10 \cdot 10^{-3}$ м), щоби температура по висоті шару змінювалась незначно. На рис. 3 зображені результати вимірювання температури теплового агенту на виході із стаціонарного шару матеріалу, звідки бачимо, що збільшення швидкості теплового агенту приводить до інтенсифікації процесу теплообміну. Горизонтальна ділянка характеризує «відносну сталість» температури теплового агенту на виході з шару матеріалу після його прогрівання. «Впадини» на цих лініях є наслідком процесу дегідратації Fe(II) сульфат гептагідрату, який відбувається з поглинанням теплоти теплового агенту та теплоти шару. Ці дані дали змогу розрахувати значення коефіцієнтів тепловіддачі α від теплового агенту до частинок Fe(II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей фільтрування теплового агенту. Залежність $\alpha = f(v)$ представлена на рис. 4.

Лінійна залежність $\alpha=f(v)$ (рис. 4) свідчить про можливість інтенсифікації процесу теплообміну під час реалізації фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату шляхом збільшення швидкості руху теплового агенту в науково обґрунтованих межах. Узагальнення експериментальних результатів теплообміну дали змогу отримати критеріальне рівняння

$$Nu_{теор} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,98} \cdot Pr^{0,33}, \quad (3)$$

яке має межі використання $20 \leq Re_e \leq 100$ і може бути застосоване для обчислення теоретичних значень коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{теор}$. (максимальна відносна похибка не перевищує $\pm 5\%$).

$$\alpha_{теор} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{v \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,98} \cdot \left(\frac{\nu}{a} \right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda}{d_e} \quad (4)$$

$T, ^\circ C$

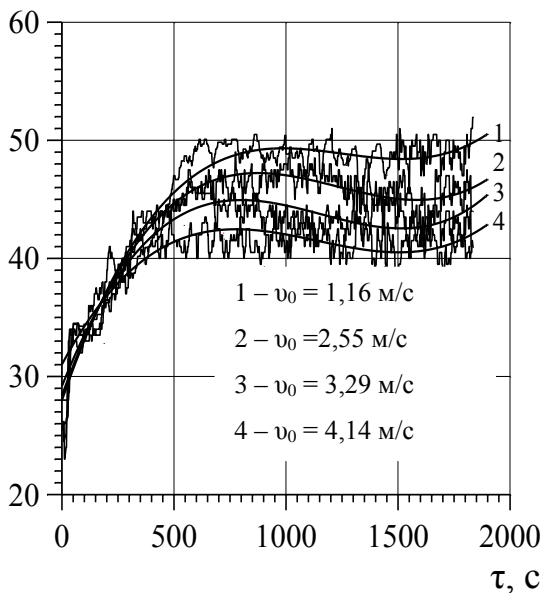


Рис. 3. Зміна температури T теплового агенту в часі τ на виході з шару Fe(II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей теплового агенту

$\alpha_{експ}, \frac{Вт}{(м^2 \cdot К)}$

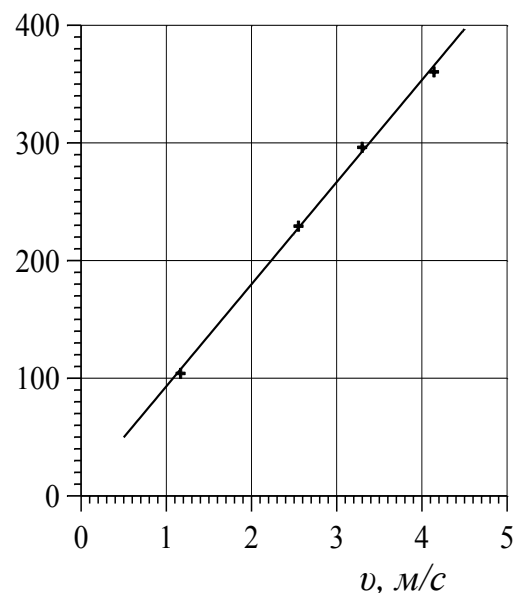


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від дійсної швидкості руху теплового агенту v

Результати досліджень впливу швидкості фільтрування теплового агенту та висоти стаціонарного шару Fe(II) сульфат гептагідрату наведені у вигляді кінетичних кривих сушіння та кривих швидкості сушіння (рис. 5), а дані дослідження динаміки видалення вологи - у вигляді залежності зміни залишкової маси вологи в шарі матеріалу від часу (рис. 6).

Із зростанням висоти шару (рис. 6, а) зростає тривалість сушіння, що пояснюється зростанням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованої перегородки. Збільшення швидкості фільтрування теплового

агенту (рис. 6, б) приводить до скорочення тривалості сушіння, оскільки збільшується кількість внесеної теплоти в пористий шар матеріалу, а також до зростання коефіцієнтів тепло- і масовіддачі, окрім цього збільшення швидкості фільтрування теплового агента сприяє зменшенню товщини гідравлічного, теплового та дифузійного шарів, що сприяє інтенсифікації процесу тепло- та масоперенесення.

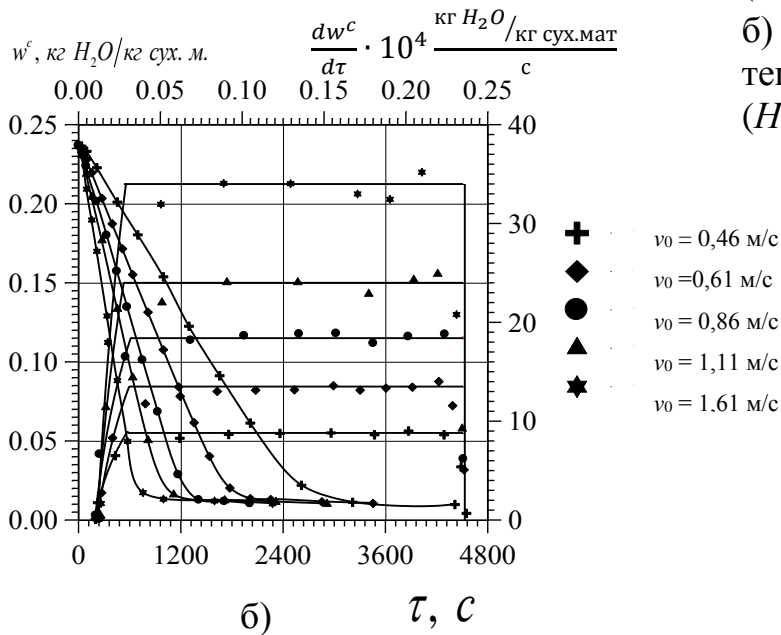
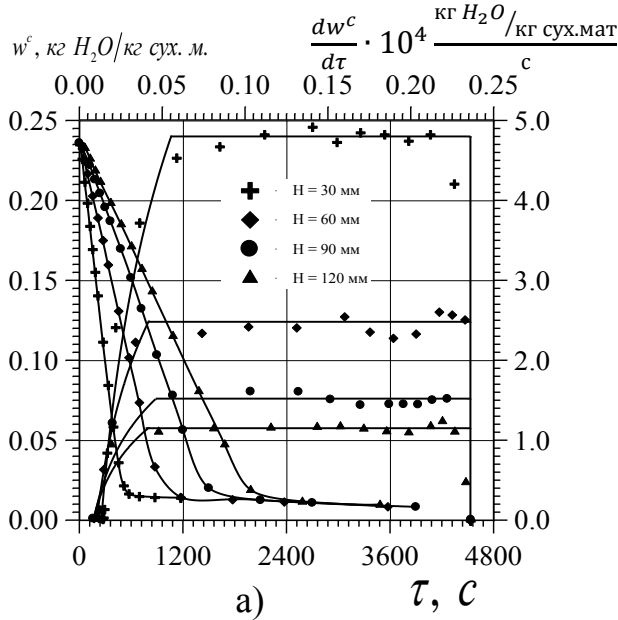


Рис. 5. Кінетичні криві сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату матеріалу та криві швидкості сушіння:

а) за різних висот шару ($v_0 = 0,86 \text{ м/с}; T = 335 \text{ K}$);

б) за різних швидкостей теплового агента ($H = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}, T = 335 \text{ K}$).

Кінетичні криві (рис. 5) характеризуються наявністю періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою. Період повного насичення теплового агента парами води існує до моменту досягнення фронту масообміну перфорованої перегородки і йому відповідає пряма лінія, тангенс кута нахилу якої визначає швидкість переміщення зони масообміну. Тангенс кута нахилу зменшується із ростом висоти, що пояснюється зростанням шляху його переміщення до

перфорованої перегородки. Із зростанням швидкості фільтрування теплового агенту тангенс кута нахилу прямих зростає, що пояснюється ростом сушильного потенціалу.

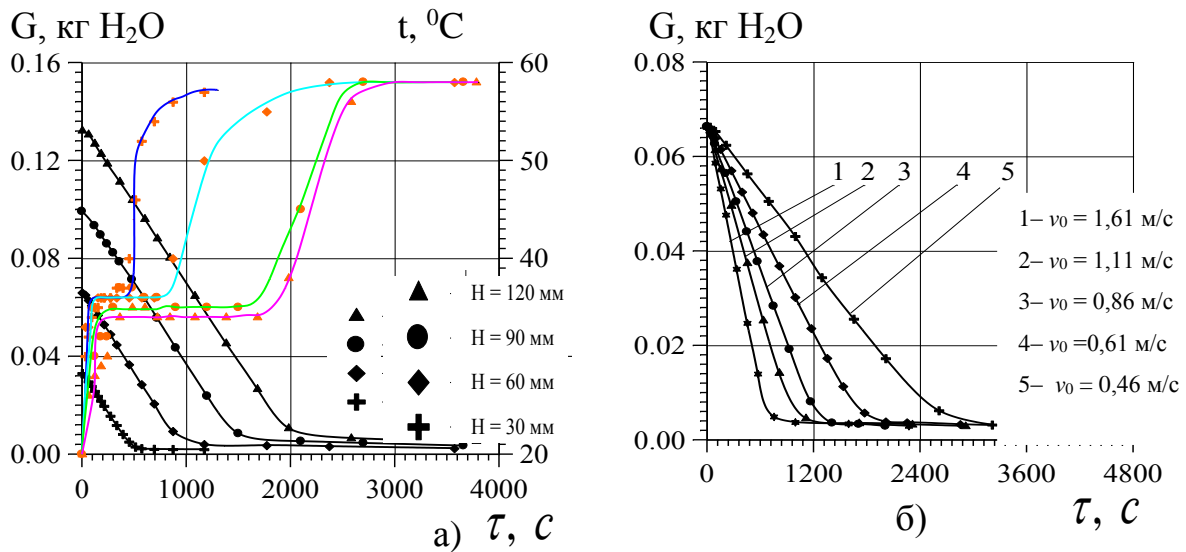


Рис. 6. Динаміка видалення вологи з шару Феруму(II) сульфат гептагідрату:

а) за різних висот шару ($v_0 = 0,86$ м/с; $T = 335$ К);

б) за різних швидкостей теплового агенту ($H = 60 \cdot 10^{-3}$ м, $T = 335$ К).

Період часткового насичення настає після досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки, внаслідок цього кількість вологого матеріалу зменшується, тепловий агент лише частково насичується парами вологи та його температура на виході із шару зростає. Цьому періоду відповідає криволінійна ділянка на кінетичних кривих фільтраційного сушіння.

З рис. 6, а видно, що зростання швидкості теплового агенту приводить до збільшення кількості вологи, що видаляється з шару за одиницю часу, а паралельність прямолінійних ділянок кривих (рис. 6, б) свідчить про те, що динаміка видалення вологи не залежить від висоти шару, а визначається величиною сушильного потенціалу теплового агенту, який залежить від температури і об'ємної витрати останнього.

Для визначення значень критичного вологовмісту $W_{кр}$ та часу його досягнення $\tau_{кр}$ за різних перепадів тиску (швидкостей руху теплового агенту), а також висот шару Феруму(II) сульфат гептагідрату, використаний метод, який полягає у побудові кінетичних кривих у координатах $lg(W - W_p) = f(\tau)$ (рис. 7).

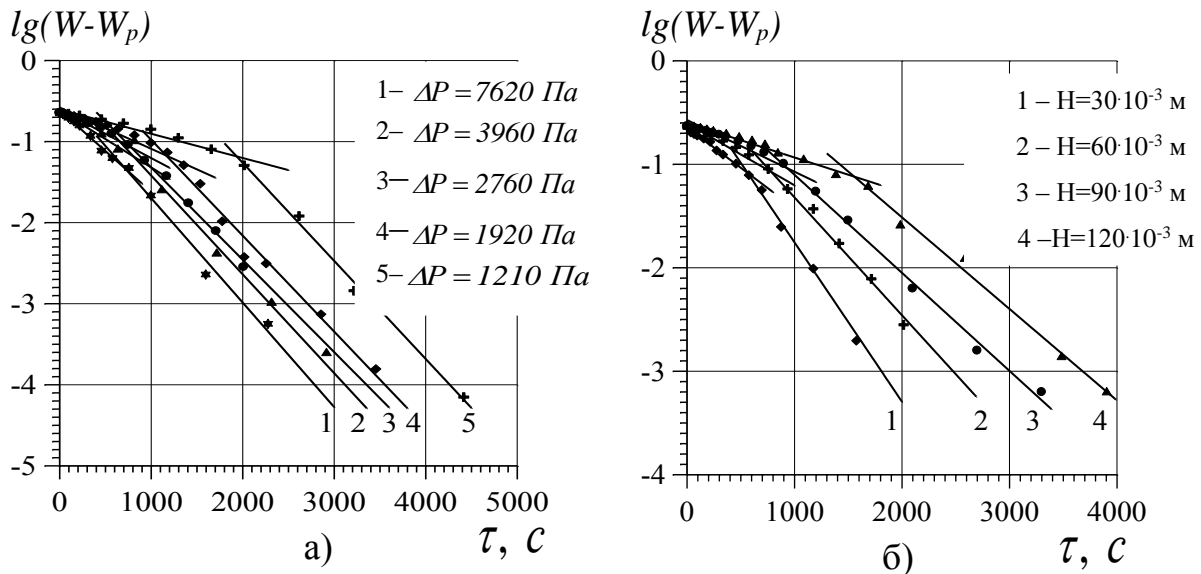


Рис. 7. Визначення критичного вологовмісту і часу його досягнення:

а) за різних перепадів тиску ($H = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $T = 335 \text{ К}$);

б) за різних висот шару Fe(II) сульфат гептагідрату ($\Delta P = 2760 \text{ Па}$, $T = 335 \text{ К}$)

З рис. 7 знайдено значення $W_{кр.} = 0,043 \text{ кг H}_2\text{O/кг сух. мат.}$. Встановлено, що збільшення перепаду тисків і, як наслідок - зростання швидкості руху теплового агенту приводить до збільшення швидкості сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату і, відповідно, значення $\tau_{кр}$ зменшується (рис. 7, а). Значення $\tau_{кр}$ із зростанням висоти шару матеріалу зростає (рис. 7, б).

Щоб описати кінетику фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату в періоді повного насичення теплового агенту вологою із експериментальних даних визначені кінетичні коефіцієнти α і a шляхом побудови графічної залежності, представлені на рис. 8. Звідси визначений $\ln(\alpha)$ за відрізком, який пряма відтинає на осі ординат, звідки $\alpha = 3,03 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$. За тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис визначене значення кінетичного коефіцієнта $a = 15,75 \text{ 1/м}$.

Стале значення кінетичного коефіцієнта «а» визначає сталість співвідношення між масовою швидкістю M та коефіцієнтом масовіддачі β , які пропорційно зростають при збільшенні швидкості руху теплового агенту. Коефіцієнт α залежить від біжучої вологості матеріалу, тобто від температури теплового агенту, так і від гідравлічного опору сухого матеріалу, тобто

$$\alpha = A \cdot \Delta p_c^n \quad (5)$$

Значення коефіцієнта A та показника степеня n є сталими для даного матеріалу і визначені з результатів експериментів, використовуючи систему рівнянь:

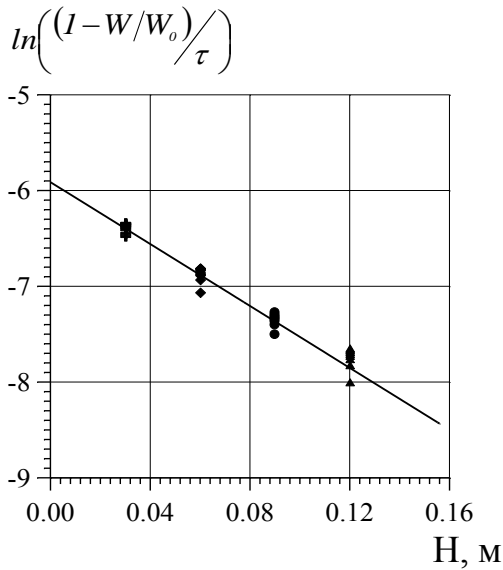


Рис. 8. Визначення коефіцієнтів α і a для Fe(II) сульфат гептагідрату

$$\begin{cases} \alpha_1 = A \cdot \Delta p_1^n \\ \alpha_2 = A \cdot \Delta p_2^n \end{cases} \quad (6)$$

Кожне рівняння відповідає таким параметрам:

- шар висотою $H=60 \cdot 10^{-3}$ м,
- температура теплового агента $T=335$ К;
- перепад тисків по сухому матеріалі в межах 1210 – 7620 Па.

Розв'язавши систему рівнянь (6), отримані значення коефіцієнта $A=6,5 \cdot 10^{-4}$ та показника степеня $n=0,2$, що показує степінь впливу опору сухого матеріалу і, як наслідок, – швидкості руху теплового агента. Отже, кінетичне рівняння, яке дає змогу прогнозувати фільтраційне сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату в періоді повного насичення вологою має вигляд:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 6,5 \cdot 10^{-4} \Delta P_c^{0.2} \cdot \tau \cdot e^{-15,75 \cdot H} \quad (7)$$

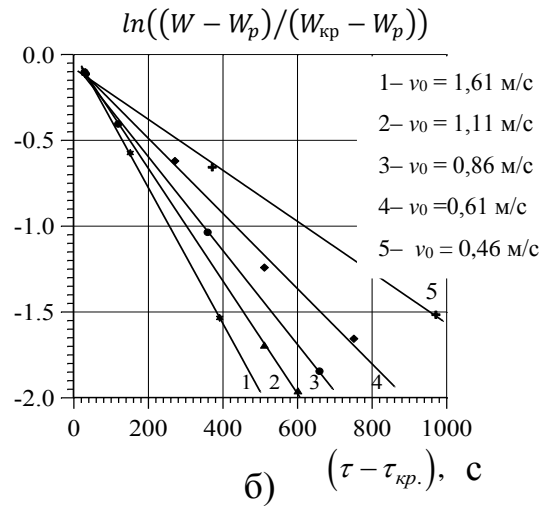
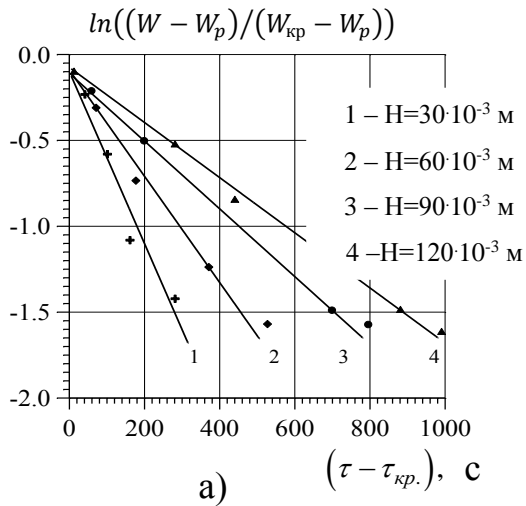


Рис. 9. Визначення коефіцієнту сушіння K :

а) за різних висот шару Fe(II) сульфат гептагідрату ($v_0 = 0,86$ м/с; $T=335$ К);

б) за різних швидкостей теплового агента ($H=60 \cdot 10^{-3}$ м; $T=335$ К).

Для узагальнення результатів дослідження кінетики фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату в періоді часткового насичення

теплового агента побудовані графічні залежності, представлені на рис. 9, які дали змогу визначити значення, що наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Швидкість сушіння N та коефіцієнт сушіння K (період часткового насичення)

T=335 K			$v_0, = 0,86$ м/с		
$v_0, \text{ м/с}$	$N \cdot 10^4, \text{ кг/(кг}\cdot\text{с)}$	$K \cdot 10^3, \text{ 1/с}$	$H \cdot 10^3, \text{ м}$	$N \cdot 10^4, \text{ кг/(кг}\cdot\text{с)}$	$K \cdot 10^3, \text{ 1/с}$
0,46	0,9	1,5	30	4,6	5,1
0,61	1,32	2,2	60	2,4	3,1
0,86	1,84	2,7	90	1,5	1,97
1,11	2,34	3,3	120	1,1	1,61
1,61	3,34	4,0	-	-	-

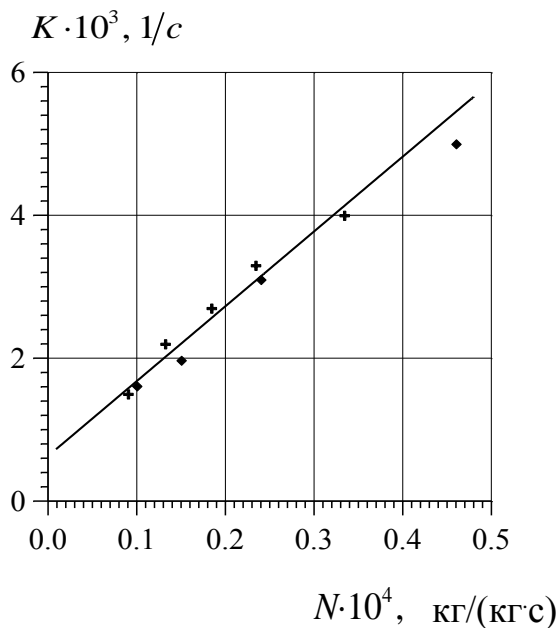


Рис. 10 Залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння N .

Визначення відносного коефіцієнту сушіння χ , що є сталим для досліджуваного матеріалу, здійснене шляхом представлення результатів експериментальних досліджень у вигляді графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 10.), з якої значення коефіцієнту визначені за тангенсом кута нахилу прямої і для Fe (II) сульфат гептагідрату становить $\chi = 10,47$ кг/кг. Використовуючи результати розрахунків, виведена залежність для визначення зміни вологовмісту Fe(II) сульфат гептагідрату в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу сушіння для періоду часткового насичення теплового агента вологою:

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-10,47 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{кр}}{N})} + W_p \quad (8)$$

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна представлені на рис. 11-12, де помітно, що інтенсифікація процесу фільтраційного сушіння відбувається із зростанням температури та швидкості теплового агента й із зменшенням висоти шару дисперсного

матеріалу. На кінетичних кривих в обох випадках розрізняються періоди повного й часткового насичення теплового агенту вологою, а у випадку деревного борошна спостерігається ще й механічне винесення вільної вологи без затрат теплової енергії.

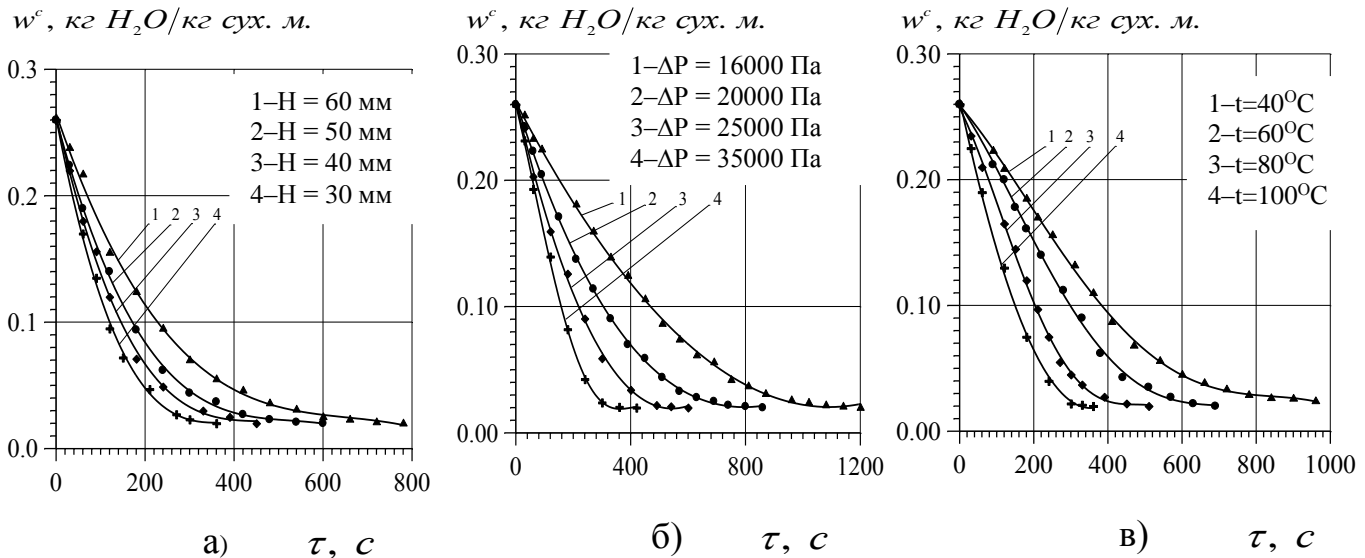


Рис. 11. Кінетичні криві сушіння залізоокисного пігменту:

а) за різних висот шару ($t=100^{\circ}\text{C}$, $\Delta P = 35000 \text{ Па}$);

б) за різних перепадів тисків по сухому матеріалові ($H=30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $t=100^{\circ}\text{C}$);

в) за різних температур ($\Delta P = 35000 \text{ Па}$; $H = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

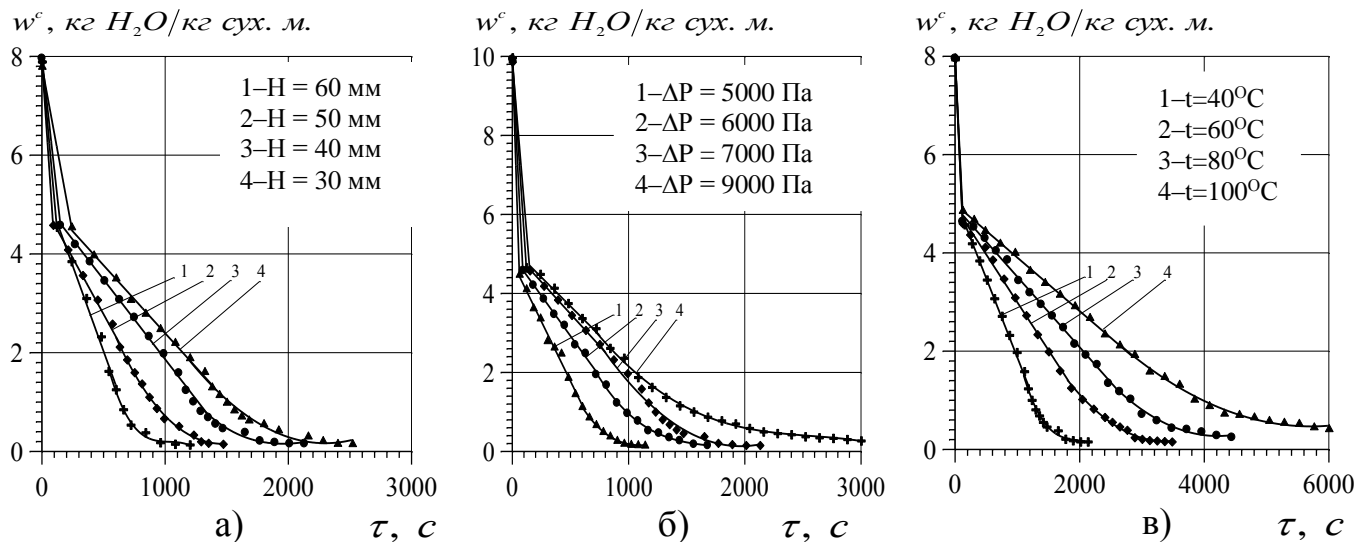


Рис. 11. Кінетичні криві сушіння деревного борошна:

Для визначення критичного вологовмісту й часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна використаний метод побудови кінетичних кривих у координатах $\lg(W-W_p) = f(\tau)$, а узагальнення результатів дослідження кінетики фільтраційного сушіння проводили, як і

у випадку Fe(II) сульфат гептагідрату, шляхом визначення кінетичних коефіцієнтів α і a з графічних залежностей, представлених на рис.13.

$$\begin{cases} \alpha_1 = A \cdot \Delta p_1^n \cdot t_1^m \\ \alpha_2 = A \cdot \Delta p_2^n \cdot t_2^m \\ \alpha_3 = A \cdot \Delta p_3^n \cdot t_3^m \end{cases} \quad (9)$$

Шляхом розв'язання системи (9) визначені коефіцієнти A , n , m , які дали змогу запропонувати кінетичні рівняння для прогнозування фільтраційного сушіння залізоокисного пігменту (10) та відпрацьованого деревного борошна (11) в періоді повного насичення теплового агенту вологою.

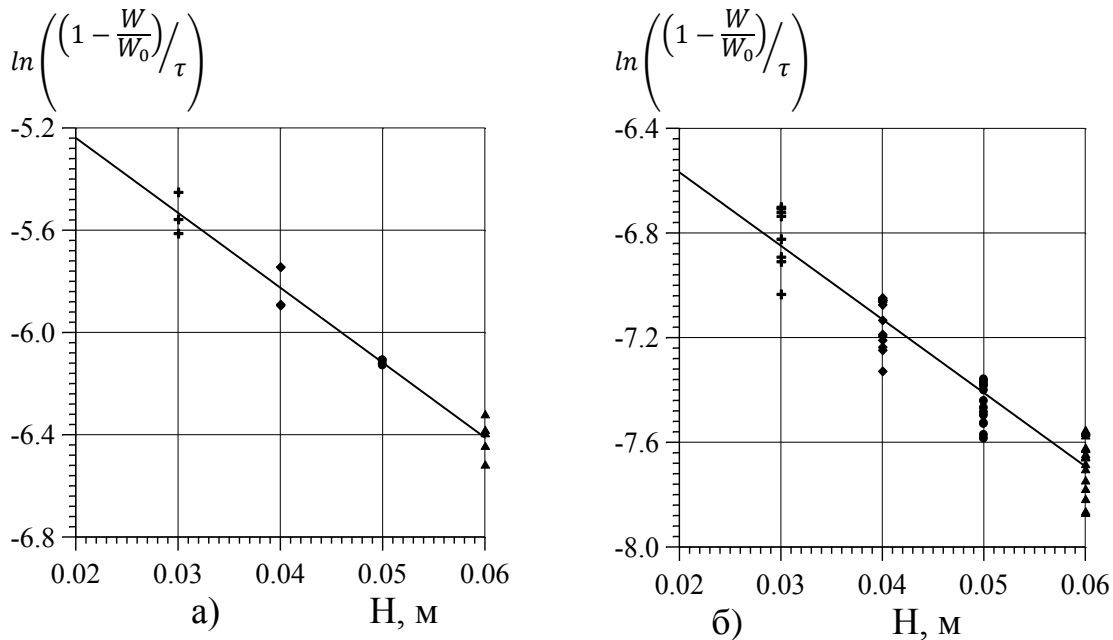


Рис. 13. Визначення коефіцієнтів α і a :

а) залізоокисного пігменту; б) відпрацьованого деревного борошна

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 0.008 \cdot \Delta p_c^{0.01} \cdot t^{0.03} \cdot \tau \cdot e^{-29.31 \cdot H}, \quad (10)$$

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 5.13 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p_c^{0.22} \cdot t^{0.03} \cdot \tau \cdot e^{-28.1 \cdot H}. \quad (11)$$

Узагальнення результатів досліджень для періоду часткового насичення теплового агенту вологою під час сушіння залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна проведене шляхом представлення експериментальних значень у координатах

$\ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = f(\tau - \tau_{кр})$ і за тангенсом кута нахилу прямих визначені значення

коефіцієнтів сушіння K , які дали змогу розрахувати відповідні значення швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агенту

вологою. Залежність $K = f(N)$ представлена на рис. 14., звідки за тангенсом кута нахилу прямих визначені відносні коефіцієнти сушіння χ для досліджуваних матеріалів.

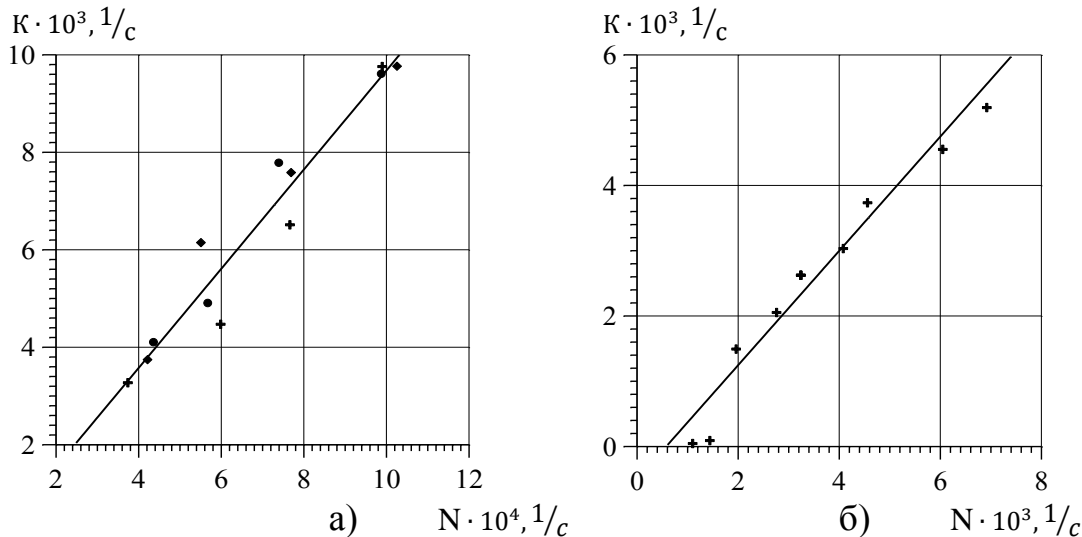


Рис. 14. Залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння N : а) залізоокисного пігменту; б) відпрацьованого деревного борошна

Розрахувавши необхідні величини, встановлена залежність для розрахунку зміни вологовмісту залізо-окисного пігменту (12) та відпрацьованого деревного борошна (13) в часі в широкому діапазоні зміни параметрів процесу сушіння для періоду часткового насичення теплового агенту вологою:

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-10,2 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{кр}}{N})} + W_p, \quad (12)$$

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-0,88 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{кр}}{N})} + W_p \quad (13)$$

У п'ятому розділі представлена схема установки для промислової реалізації сушіння дисперсних матеріалів, розроблена на основі узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки та кінетики фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів. Відповідно до наведеної методики проведені основні технологічні розрахунки для проектування установки фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, а також проведені обчислення енергетичних затрат на реалізацію даного процесу.

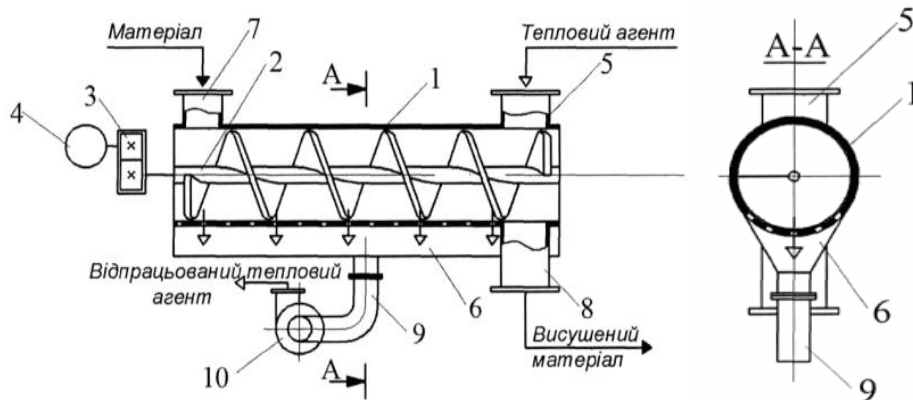


Рис. 15. Установа фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів:

1 – корпус, 2 – шнек, 3 – редуктор, 4 – двигун, 5 – патрубок подачі теплового агенту, 6 – камера розрідження, 7 – патрубок подачі волого матеріалу, 8 – патрубок вивантаження сухого матеріалу, 9 – патрубок відпрацьованого теплового агенту, 10 – вентилятор.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено вирішення науково-прикладного завдання фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, зокрема Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

1. В результаті проведення критичного аналізу джерел літератури встановлено, що процес фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів потребує розвитку теоретичних аспектів шляхом експериментального дослідження гідродинаміки профільтровування теплового агенту крізь стаціонарний шар та встановлення впливу кінетики й динаміки на процес дегідратації Fe(II) сульфат гептагідрату та сушіння відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

2. Експериментально визначені фізико-механічні параметри стаціонарного шару Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

3. Запропоновані розрахункові залежності (1), (2) та (табл. 1) для опису гідродинаміки досліджуваних матеріалів, які дають змогу прогнозувати енергетичні затрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння.

4. Експериментально встановлені коефіцієнти тепловіддачі під час фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату залежно від швидкості руху теплового агенту й запропоновані залежності (3), (4) для їх розрахунку.

5. Експериментально досліджено кінетику та динаміку під час фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого

деревного борошна й залізоокисного пігменту за змінних параметрів теплового агента та висоти шару матеріалу й запропоновано кінетичні рівняння, що описують зміну вологовмісту досліджуваних дисперсних матеріалів у періодах повного (7), (10), (11) та часткового (8), (12), (13) насичення вологою теплового агенту.

6. Розроблена принципова схема сушильної установки, захищена патентом України №120178 та методику розрахунку її основних конструктивних розмірів, що підкріплена патентом України на винахід.

7. Результати дисертаційної роботи передані для впровадження на ДП «Аргентум» та ТЗОВ «Галвесттрейд».

Основні умовні позначення

H - висота шару, m ; t - температура теплового агента, $^{\circ}C$, K ; T - температура твердої фази, $^{\circ}C$; G - маса вологи, kg ; W - вологовміст матеріалу, kg вологи/ kg сух. мат; d_c - усереднений діаметр частинки, m ; α - коефіцієнт тепловіддачі, $Wm/(m^2 \cdot K)$; ΔP - втрати тиску, Pa ; ρ_c - густина теплового агента і твердого матеріалу відповідно, kg/m^3 ; τ - час, s ; v_o , v - відповідно фіктивна і дійсна швидкість, m/s . **Безрозмірні комплекси:** $Ei = \Delta P / (\rho \cdot v^2)$ - число Ейлера; $Nu = \alpha \cdot d_e / \lambda$ - число Нуссельта; $Re = v \cdot d \cdot \rho / \mu$ - число Рейнольдса; **Індекси:** нижній: min - мінімальний; 0 , p - початковий стан; k - кінцевий стан; cr - критичний стан; r - рівноважний стан; nas - насичення.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Ханик Я. М., Цюра Н. Я., Дулеба В. П. Гідродинаміка сухого дисперсного матеріалу (залізоокисного пігменту). *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2006. Вип. 28, т. 2. С. 10. (Особистий внесок дисертанта: збір літературних даних, експериментальне дослідження гідравлічного опору шару залізоокисного пігменту).

2. Цюра Н. Я., Ханик Я. М. Кінетика сушіння жовтого залізоокисного пігменту. *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2007. Вип. 31, т. 1. С. 107–110. (Особистий внесок дисертанта: дослідження кінетики сушіння, узагальнення результатів та написання статті.)

3. Ханик Я. М., Цюра Н. Я. Гідродинаміка руху теплоносія крізь шар сухого дисперсного матеріалу (органічних відходів виробництва TiO_2). *Науковий вісник НЛТУ України*. 2008. Вип. 18.3. С. 160–162. (Особистий внесок дисертанта: експериментальне дослідження гідродинаміки руху

теплового агента крізь стаціонарний шар органічних відходів виробництва TiO_2 , обговорення результатів та написання статті.)

4. Цюра Н. Я., Атаманюк В. М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2015. Вип. 47, т. 1. С. 153–159. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.373> (Особистий внесок дисертанта: дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар залізного купоросу, обговорення результатів та написання статті.)

5. Цюра Н. Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В. М., Госовський Р.Р. Динаміка видалення вологи з Ферум(II) сульфат гептагідрату під час процесу зневоднення фільтраційним методом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 1. С. 74–79. <https://doi.org/10.36930/40310112>. (Особистий внесок дисертанта: дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар залізного купоросу, обговорення результатів та написання статті.)

6. Tsiura N., Kindzera D., Huzova I., Atamanyuk V. Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. *ScienceRise*, 2021. №1, С. 11-21. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.001583>. (Особистий внесок дисертанта: узагальнення результатів експериментальних досліджень, обговорення результатів та написання статті.)

7. В.Лаптев, Н.Цюра, В.Атаманюк. Сушіння залізного купоросу фільтраційним способом. Львівські хімічні читання: зб. наук. пр., 26-29 травня 2013 року. С19. (Особистий внесок дисертанта: проведені експериментальні дослідження, опрацьовані результати).

8. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. Гідродинамічні закономірності фільтраційного сушіння залізного купоросу. Сучасні проблеми науки і технологій в умовах забезпечення сталого розвитку економіки: «MPST-I-2015», Миргород, 20-24 квітня 2015 р. С. 196-199. (Особистий внесок дисертанта: Проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів та написання тез).

9. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. Збірник праць V міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса, 7-11 вересня 2015 р. С.-40. (Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, побудова графічних залежностей, обговорення результатів, написання тез та виступ на конференції).

10. Tsiura N., Atamanyuk V., Pelekh M. Recovery of wastes from titanium (IV) oxide production. Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин. Львів, 5-7 листопада 2015 р., С. 84. (Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обговорення результатів, написання тез).

11. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М., Цимбалістий О.В., Дулеба В.П. Особливості фільтраційного сушіння залізного купоросу. Програма і матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості». Київ, 8-10 листопада 2016 р., С. 50. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обговорення результатів, написання тез).*

12. Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. Сушіння залізного купоросу фільтраційним методом. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». М.Львів, 14 вересня 2018 р., С. 84. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, узагальнення та обговорення результатів, написання тез).*

13. Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Госовський Р.Р. Теплообмін під час фільтраційного сушіння залізного купоросу. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique 05.02.2021, Париж, FRA* <https://doi.org/10.36074/logos-05.02.2021.v3.07> *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, математичне опрацювання результатів, написання тез).*

14. Патент України № 120178 на винахід. Установа фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Гаврилів Р.І, Цюра Н.Я., Микичак Б.М. //Заявл. 14.11.2016, опубл. 25.10.2019 , Бюл. №20, С.3. *(Особистий внесок дисертанта: запропонована ідея винаходу, патентний пошук).*

АНОТАЦІЇ

Цюра Н.Я. Сумісний процес фільтрування та сушіння дисперсних матеріалів. 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” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, зокрема Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту з метою проектування енергоощадного обладнання. Встановлені основні фізико-механічні характеристики стаціонарного шару досліджуваних матеріалів, а саме: насипна густина, пористість, питома поверхня, еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент, усереднений діаметр частинок. На основі узагальнення результатів досліджень гідродинаміки запропоновані

рівняння для встановлення гідравлічного опору стаціонарного шару за різних параметрів теплового агента, які можуть бути використані на етапі проектування нового сушильного обладнання.

Експериментальним шляхом досліджений теплообмін під час фільтраційного сушіння й запропоновані критеріальні залежності у вигляді безрозмірних комплексів для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агента до шару Fe(II) сульфат гептагідрату. Встановлений характер впливу висоти стаціонарного шару Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, а також температури теплового агента й швидкості фільтрування на інтенсивність фільтраційного сушіння та запропоновані розрахункові залежності для прогнозування процесу висушування вказаних матеріалів в періодах повного та часткового насичення теплового агента вологою.

Розроблена схема сушильної установки для зневоднення дисперсних матеріалів в стаціонарному шарі шляхом профільтрування теплового агента крізь пористу структуру, на яку отриманий патент України на винахід. Наведена методика розрахунку та проведені технологічні обчислення, які дали змогу розрахувати основні розміри сушарки та встановити параметри процесу фільтраційного сушіння.

Ключові слова: фільтраційне сушіння, залізний купорос, деревне борошно, залізоокисний пігмент, тепломасообмін, кінетика, динаміка, вологовміст, тепловий агент.

АННОТАЦИЯ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 - процессы и оборудование химической технологии (161 - Химическая технология и инженерия). - Национальный университет "Львовская политехника" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2021.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям фильтрационного сушки дисперсных материалов, в частности Fe (II) сульфат гептагидрата, отработанного древесной муки и железистоокисного пигмента с целью проектирования энергосберегающего оборудования. Установлены основные физико-механические характеристики стационарного слоя исследуемых материалов, а именно: насыпная плотность, пористость, удельная поверхность, эквивалентный диаметр каналов, через которые фильтруется тепловой агент, усредненный диаметр частиц. На основе обобщения результатов исследований гидродинамики предложены уравнения для установления гидравлического сопротивления стационарного слоя при различных параметрах теплового агента, которые могут быть использованы на этапе проектирования нового сушильного оборудования.

Экспериментальным путем исследован теплообмен при фильтрационном сушки и предложены критериальные зависимости в виде безразмерных комплексов для определения коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к слою Fe (II) сульфат гептагидрата. Установлен характер влияния высоты стационарного слоя Fe (II) сульфат гептагидрата, отработанного древесной муки и железистоокисного пигмента, а также температуры теплового агента и скорости фильтрования на интенсивность фильтрационного сушки и предложены расчетные зависимости для прогнозирования процесса сушки указанных материалов в периодах полного и частичного насыщения теплового агента влагой.

Разработана схема сушильной установки для обезвоживания дисперсных материалов в стационарном слое путем профильтровывания теплового агента сквозь пористую структуру, на которую получен патент Украины на изобретение. Приведенная методика расчета и проведены технологические вычисления, которые позволили рассчитать основные размеры сушилки и установить параметры процесса фильтрационного сушки.

Ключевые слова: фильтрационное сушки, железный купорос, древесная мука, железистоокисный пигмент, тепломассообмен, кинетика, динамика, влагосодержание, тепловой агент.

ABSTRACT

Tsiura N. The compatible process of filtering and drying of dispersed materials. – On the rights of manuscript.

Dissertation for a candidate degree in technical sciences in specialty 05.17.08 - Processes and the Equipment of chemical technology competition. - Lviv Polytechnic National University , Ministry of Education and Science of Ukraine. Lviv, 2021.

The work deals with the filtration method for drying Fe (II) sulfate of heptahydrate, the exhausted wood flour and iron oxide pigment. This method is elected as the most effective according to the critical analysis of literature data. The work is dedicated to the theoretical and experimental researches of filtration drying of dispersed materials, in particular Fe (II) sulfate of heptahydrate, the exhausted wood flour and iron oxide pigment for the purpose of designing of the energy saving equipment. The basic physical and mechanical characteristics of the stationary layer of the studied materials are determined, such as: bulk density, porosity, specific surface area, averaging of particles size, equivalent diameter of the channels through which the heat agent is filtered. On the basis of obtained experimental data of hydrodynamics research, the equations for establishing the hydraulic resistance of the stationary layer at variable parameters of the heat agent are proposed. Heat transfer during filtration drying is investigated experimentally and criterion dependences in the form of dimensionless complexes for determination of heat transfer coefficients from heat agent to Fe (II) sulfate heptahydrate layer are proposed. The nature of the influence of the height of the stationary layer of Fe (II) sulfate heptahydrate, exhausted wood flour and iron oxide pigment, as well as the temperature of the heat agent and filtration rate on the intensity of filtration drying and the proposed dependences for predicting the drying process of these materials. The basic scheme of the drying installation for dehydration of dispersed materials, a technique of its calculation are developed and the basic technological calculations are carried out. The patent of Ukraine for the invention has protected the plant.

Key words: filtration drying, iron copperas, wood flour, iron oxide pigment, heat and mass transfer, kinetics, dynamics, moisture content, heat agent.