

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

Д. П. Кіндзера, В. В. Кочубей, В. М. Атаманюк, Н. Я. Цюра, А. Б. Гелеш
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії
diana.p.kindzera@lpnu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ ФАКТОРІВ НА КІНЕТИКУ ПРОЦЕСУ ДЕГІДРАТАЦІЇ ЗАЛІЗА (II) СУЛЬФАТ ГЕПТАГІДРАТУ ФІЛЬТРАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

<https://doi.org/10.23939/ctas2023.01.110>

Запропоновано фільтраційний метод поетапної дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату. На основі узагальнення експериментальних даних гідродинаміки процесу, отримано розрахункову залежність, що дає змогу теоретично визначати втрати тиску у стаціонарному шарі $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. За результатами комплексного термічного аналізу, встановлено закономірності протікання процесу дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в різних температурних інтервалах. Для реалізації дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, з відщепленням перших трьох молекул кристалізаційної води, обрано температуру 339 К, яка забезпечує збереження кристалічного стану продукту. Досліджено кінетику видалення вологи з $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ за різних висот шару матеріалу та швидкостей руху теплового агента. На основі проведених розрахунків енергозатрат, встановлено оптимальні параметри процесу: висоту стаціонарного шару $H = 60 \cdot 10^{-3}$ м та фіктивну швидкість руху теплового агента $v_0 = 0,86$ м/с.

Ключові слова: заліза (II) сульфат гептагідрат; залізоокисні пігменти; процес дегідратації; тепловий агент; стаціонарний шар; кристалізаційна вода; термічний аналіз.

Вступ

Титан (IV) оксид є одним із найрозповсюджених білих пігментів, що має широке застосування у виробництві товарів різного призначення, зокрема титанових білил, пластичних мас та матеріалів на їх основі, каучуку, гуми, лінолеуму, паперу, картону, шпалер, синтетичних волокон тощо [1]. Сульфатний метод виробництва титан (IV) оксиду, що базується на розкладанні титановмісної руди сульфатною кислотою, з утворенням розчинів сульфатів титану, заліза та інших металів, із подальшим їх гідролітичним очищенням від домішок, є основним методом отримання TiO_2 у більшості європейських країн [2]. Значним недоліком сульфатного методу є утворення значної кількості супутніх продуктів та відходів на кожній стадії виробничого процесу, зокрема титановмісних відходів, гідролітичної сульфатної кислоти, кислих стоків, шламів [3, 4]. На стадії готування розчинів титан (IV) сульфату, шляхом кристаліза-

ції та відокремлення з розчину, одержують заліза (II) сульфат гептагідрат ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) у кількості 4,5–6 т/т товарного TiO_2 [2; 4]. Незважаючи на те, що побічний продукт використовується в багатьох промислових сферах, зокрема у хімічній промисловості, – для отримання коагулянтів для очищення стічних вод [5], активних додатків до цементу та ферро-гіпсу [6–8], синтезу фератів лугів [9, 10], сульфатної кислоти [11], вказані способи утилізації не забезпечують суттєвого зменшення обсягів його накопичення. Розширення промислової сфери застосування утворюваного та відвального $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ можна досягнути шляхом збільшення тоннажності виробництва жовтих та червоних залізоокисних пігментів [12]. Рішення, що передбачає залучення побічних продуктів у виробничий процес, сприятиме вирішенню як екологічної проблеми, пов'язаної з накопиченням відходів та негативним їх впливом на довкілля та живі організми, так і проблеми економії сировинних матеріалів.

Важливим практичним завданням, яке постає перед виробниками залізоокисних пігментів, є реалізація процесу висушування кристалогідратів $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ для видалення вільної вологи та їх дегідратація для видалення кристалізаційної води.

В літературних джерелах міститься недостатній об'єм інформації щодо способів сушіння кристалогідратів та їх дегідратації, зокрема заліза (II) сульфат гептагідрату. Проведений аналіз науково-технічних публікацій дозволив встановити, що процеси сушіння $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ конвективним методом у барабанних сушарках та сушарках киплячого шару є тривалими та енергозатратними. Автори роботи [13] вказують на можливість застосування ІЧ-випромінювання для сушіння заліза(II) сульфат гептагідрату та відзначають переваги методу, зокрема зменшення тривалості процесу, у порівнянні з конвективним, можливість чіткого дотримання температурного режиму, що дає змогу реалізувати процес сушіння без досягнення температури плавлення продукту. Однак ІЧ-сушіння є ефективним лише для тонкого шару продукту, а енергозатрати на реалізацію процесу є суттєвими. У промислових умовах дегідратацію $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ реалізують шляхом терморозкладу (прожарювання) за температур 700–800 °С. Процес відбувається за сумарною реакцією [14, 15]: $2\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_2 + \text{SO}_3 + 7\text{H}_2\text{O}$. Внаслідок прожарювання $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ утворюється темний продукт, який є непридатним для використання в якості пігменту, оскільки містить певну кількість нерозкладеного FeSO_4 , що зумовлює залишкову кислотність, тому виникає необхідність у ретельному багатоступеневому промиванні продукту. Окрім цього, у процесі прожарювання заліза(II) сульфат гептагідрату одержують продукт із значним вмістом спечених агломератів, які утворюються внаслідок розчинення FeSO_4 у кристалізаційній воді [14]. Для уникнення вказаних недоліків щодо якості отриманого продукту, доцільним є проведення постадійного процесу дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ із можливістю відведення відщепленої кристалізаційної води із зони апарату.

Для реалізації визначеного завдання щодо сушіння та дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, запропоноване технологічне рішення, за основу якого взятий фільтраційний метод [16, 17]. Завдяки

досягненню високих значень коефіцієнтів тепло- та масопередачі внаслідок інтенсивного контакту між рухомим тепловим агентом та кристалічним продуктом, що розташовується на перфорованій решітці, досягається інтенсифікація процесу сушіння та постадійна дегідратація продукту за належних температурних режимів, яка супроводжується винесенням вологи з робочої зони установки. Дане технологічне рішення сприяє зменшенню енергетичних затрат на реалізацію процесу сушіння, у порівнянні з традиційними промисловими методами, а винесення вологи із зони сушіння забезпечує перебування продуктів дегідратації у кристалічній формі без розчинення у кристалізаційній воді. Утворені в результаті дегідратації сполуки будуть залученими у виробничий процес отримання залізоокисних пігментів.

Дослідження гідродинаміки під час профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар заліза(II) сульфат гептагідрату мають важливе значення, адже величина гідравлічного опору визначає енергетичні затрати на реалізацію процесу сушіння та дегідратації. Оскільки варіювання технологічними параметрами фільтраційного процесу дає змогу змінювати енергозатрати на реалізацію останнього та інтенсифікувати процес, то для встановлення оптимальних режимних параметрів процесу сушіння та дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату, потрібно дослідити кінетику процесу за різних геометричних розмірів стаціонарного шару матеріалу та швидкостей профільтрування теплового агенту. Важливим є проведення досліджень термічного аналізу заліза (II) сульфат гептагідрату, оскільки отримані дані дадуть змогу охарактеризувати постадійний процес дегідратації зразків за певних температурних режимів та вибрати оптимальні температури для його реалізації фільтраційним методом.

Метою статті є дослідження гідродинаміки процесу профільтрування теплового агенту крізь: стаціонарний шар заліза (II) сульфат гептагідрату; визначення температурних режимів для реалізації постадійного процесу дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату на основі термічного аналізу; встановлення кінетичних особливостей сушіння та дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату фільтраційним методом за змінних висот стаціонарного шару матеріалу та

швидкостей профільтрування теплового агенту для встановлення оптимальних параметрів процесу.

Матеріали та методи досліджень

Заліза (II) сульфат гептагідрат ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – є полідисперсною сумішшю гіроскопічних моноклінних кристалів кутастої форми, усереднений діаметр яких становить $d_n = 0,77 \cdot 10^{-3}$ м. Для реалізації фільтраційного процесу, заліза (II) сульфат гептагідрат перебуває в стаціонарному шарі, в якому сформовані канали еквівалентним діаметром $d_e = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м, крізь які фільтрується тепловий агент.

Для дослідження гідродинаміки фільтраційного процесу сушіння та дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату використана експериментальна установка [16, 17], а дослідження проведені згідно із стандартної методики. Діапазон зміни висоти стаціонарного шару матеріалу обрано, згідно з рекомендаціями, наведеними в роботі [16], де мінімальна висота шару повинна бути не меншою, ніж $20d_e$ та із міркувань забезпечення максимально можливого рівномірного прогрівання шару. Витрата теплового агенту визначалася за показами витратоміра, а втрати тиску – за показами електронного вакуумметра.

Термічний аналіз зразків заліза (II) сульфат гептагідрату проводили на дериватографі Q – 1500 D системи “Паулік – Паулік – Ердей” з реєстрацією аналітичного сигналу втрати маси та теплових ефектів за допомогою комп’ютера [18]. Зразки аналізувалися в динамічному режимі з швидкістю нагрівання 0,8; 2,0; 3,0 К/хв у середовищі повітря. Для досліджень брали наважки масою 200 г. Еталонною речовиною був алюміній оксид Al_2O_3 .

Дослідження кінетики сушіння та дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату проводили за різних висот шару матеріалу ($H = 30, 60, 90, 120$ мм) та за різних фіктивних швидкостей профільтрування теплового агенту ($v_0 = 46; 0,61; 0,86, 1,11; 1,61$ м/с), використовуючи експериментальну установку [16]. Діапазон зміни швидкостей теплового агенту обрано із врахуванням продуктивності промислових вентиляторів та зважаючи на те, що в промислових установках загальна площа зони сушіння може становити 4–6 м². Для проведення досліджень контейнер, на перфо-

рованому дні якого формувався шар заліза (II) сульфат гептагідрату, під’єднувався до ресивера установки; за допомогою електронного терморегулятора встановлювалась температура теплового агенту, нагрітого в калорифері, вибрана на основі результатів термічного аналізу; за допомогою регулюючого вентиля встановлювалась витрата теплового агенту, який профільтрувався крізь стаціонарний шар матеріалу, і вимірювалась за допомогою електронного витратоміра. В ході експерименту визначалась зміна маси матеріалу через відповідні проміжки часу (30–60 с) ваговим методом.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати експериментальних досліджень гідродинаміки для різних висот шару заліза (II) сульфат гептагідрату представлені на рис. 1.

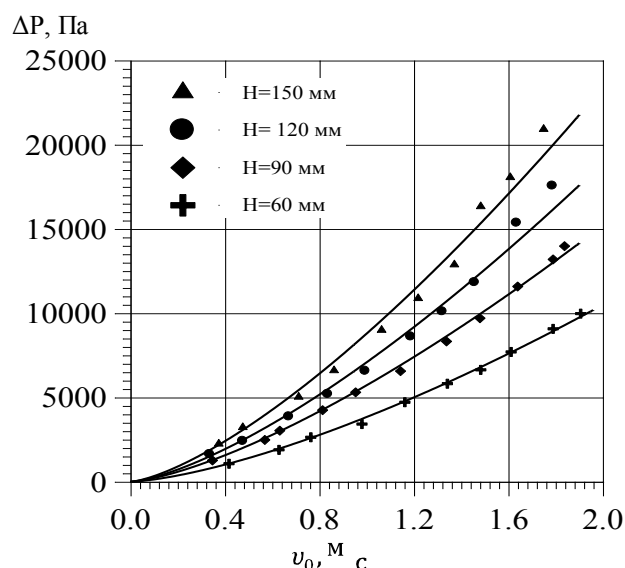


Рис. 1. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі заліза (II) сульфат гептагідрату від фіктивної швидкості руху теплового агенту

Аналіз графічних залежностей вказує на зростання втрат тиску в шарі матеріалу за зростання його висоти та фіктивної швидкості профільтрування теплового агенту. Загалом, невисокі значення гідравлічного опору рухові теплового агенту для шару заліза (II) сульфат гептагідрату вказує на доцільність застосування фільтраційного методу як енергозберігаючого.

Процес профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар матеріалу розглядали як зовнішню задачу гідродинаміки, приймаючи

за характерний розмір усереднений діаметр частинок матеріалу (d_c). Узагальнення результатів гідродинаміки представлені на рис. 2 у вигляді критеріальної залежності $Eu = f(Re_{зovн})$.

Після представлення експериментальних даних (рис. 2) у логарифмічних координатах та їх апроксимації степеневою функцією, отримана розрахункова залежність:

$$Eu_{зovн} = 155 \cdot Re_{зovн}^{-0,55} \cdot \frac{H}{d_c} \quad (1)$$

Розрахункова залежність (1) дає змогу теоретично визначати втрати тиску у стаціонарному шарі заліза (II) сульфат гептагідрату в межах досліджуваних висот шару з достатньою точністю, отже, має практичне застосування для прогнозування енергетичних затрат на реалізацію процесу сушіння та дегідратації.

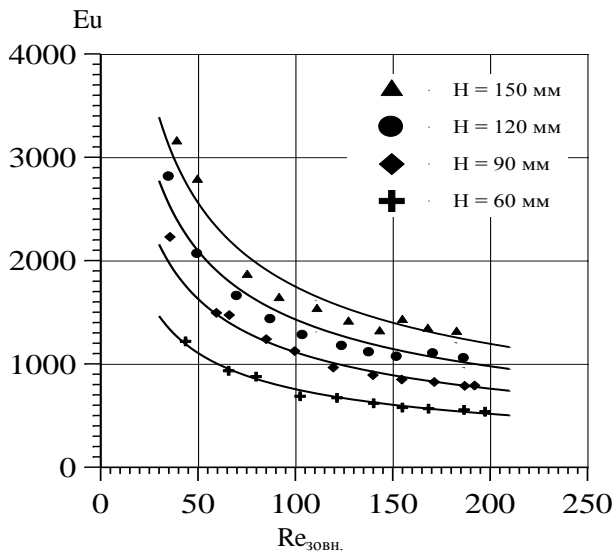


Рис. 2. Залежність критерію Ейлера від критерію Рейнольдса

На рис. 3 представлена термограма зразка заліза (II) сульфат гептагідрату, отримана за швидкості нагрівання 0,8 К/хв.

Термогравіметричні криві (ТГ) відображають втрату маси зразка під час нагрівання. Диференційні термогравіметричні криві (ДТГ) є результатом диференціювання кривих ТГ і відповідають швидкості втрати маси зразка. Криві диференційного термічного аналізу (ДТА) відображають тепловий ефект процесу [18].

На рис. 4–6 наведено результати комплексного термічного аналізу з порівнянням кривих ТГ, ДТГ та ДТА зразків заліза (II) сульфат гептагідрату, отриманих за різних швидкостей нагрівання, а саме 0,8; 2,0 та 3,0 К/хв. У табл. 1 міс-

ються результати обробки даних комплексного термічного аналізу зразків заліза (II) сульфат гептагідрату. Як видно із результатів комплексного термічного аналізу, процес дегідратації зразка заліза (II) сульфат гептагідрату протікає впродовж двох стадій до утворення $FeSO_4 \cdot H_2O$.

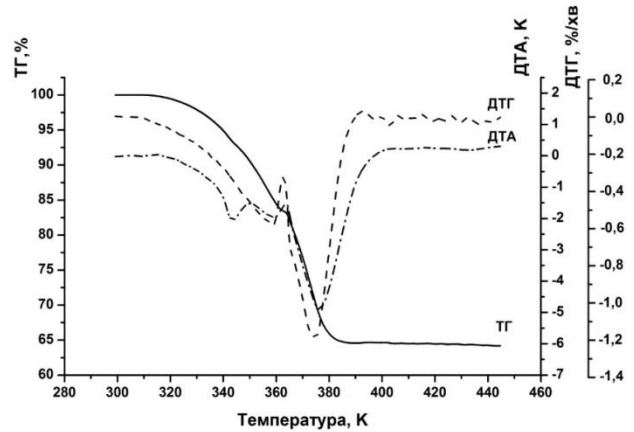


Рис. 3. Термограма зразка заліза (II) сульфат гептагідрату, отримана за швидкості нагрівання 0,8 К/хв

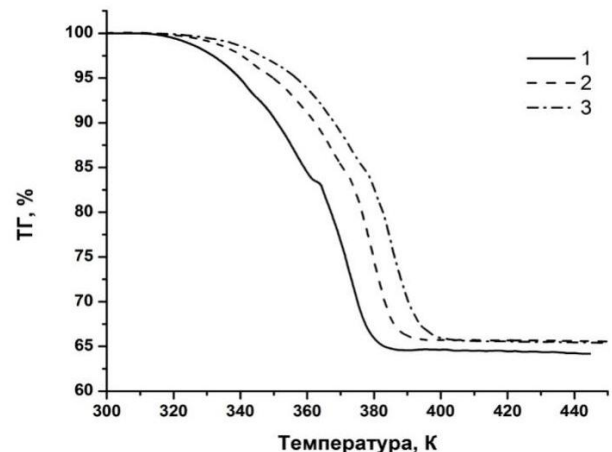


Рис. 4. Криві ТГ зразків заліза (II) сульфат гептагідрату, отриманих за швидкості нагрівання: 1 – 0,8 К/хв; 2 – 2,0 К/хв; 3 – 3,0 К/хв

На першій стадії, яка за різних швидкостей нагрівання протікає у температурному інтервалі 290–378 К (табл. 1), відбувається втрата трьох молекул кристалізаційної води. Процес протікає за схемою $FeSO_4 \cdot 7H_2O \rightarrow FeSO_4 \cdot 4H_2O + 3H_2O$ і супроводжується появою чітких екстремумів на кривих ДТГ та ендотермічних ефектів на кривих ДТА. Поява неглибокого ендотермічного ефекту, максимум якого за різних швидкостей нагрівання проявляється на кривих ДТА в межах температур 343–350 К, відповідає процесу плавлення кри-

талогідрату. Отже, втрата перших трьох молекул кристалізаційної води супроводжується плавленням зразка. Тобто, за даними термічних досліджень, встановлено, що за температур 343–350 К процес дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ протікає у розплаві.

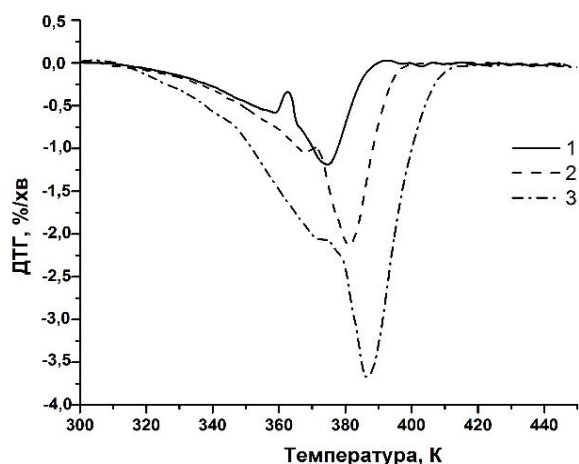


Рис. 5. Криві ДТГ зразків заліза (II) сульфатгептагідрату, отриманих за швидкості нагрівання: 1 – 0,8 К/хв; 2 – 2,0 К/хв; 3 – 3,0 К/хв

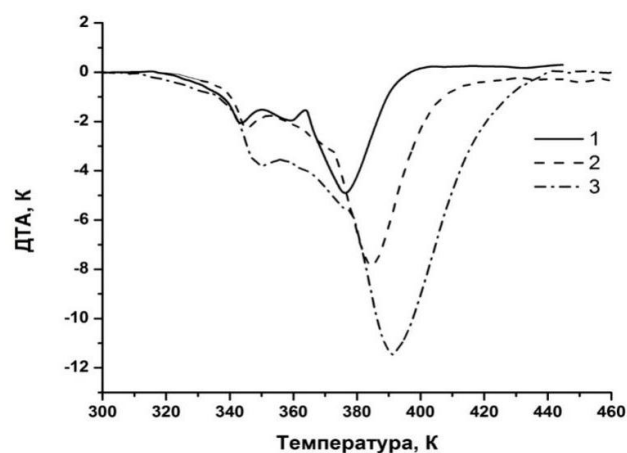


Рис. 6. Криві ДТА зразків заліза (II) сульфатгептагідрату, отриманих за швидкості нагрівання: 1 – 0,8 К/хв; 2 – 2,0 К/хв; 3 – 3,0 К/хв

Друга стадія дегідратації з відщепленням трьох молекул води протікає у температурному інтервалі 363–417 К і відповідає схемі $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$. Вона супроводжується появою глибоких ендотермічних ефектів на кривих ДТА та стрімких екстремумів на кривих ДТГ.

Таблиця 1

Результати комплексного термічного аналізу зразків заліза (II) сульфат гептагідрату, отриманих за певних швидкостей нагрівання

Швидкість нагрівання, К/хв	Стадія	Температурний інтервал, К	Температура макс. швидкості втрати маси, К	Температура максимуму ендоефекту, К
0,8	I	290 – 363	359	359
	II	363 – 392	375	376
2,0	I	290 – 371	368	не виражений
	II	371 – 409	380	385
3,0	I	290 – 378	372	не виражений
	II	378 – 417	386	392

Необхідно зауважити, що зростання швидкості нагрівання впливає на тип протікання процесу дегідратації. Із зростанням швидкості нагрівання температурні інтервали втрати кристалізаційної води на першій та другій стадіях дегідратації та максимуми екстремумів на диференційних кривих зміщуються в бік вищих температур.

Втрата перших трьох молекул кристалізаційної води на першій стадії дегідратації при швидкості нагрівання 0,8 К/хв завершується за температури 363 К. При швидкості нагрівання 2,0 К/хв та 3,0 К/хв стадія завершується за температур 371 К та 378 К, відповідно. Зразки най-

більш інтенсивно втрачають масу за температур 359 К, 368 К та 372 К при їх нагріванні зі швидкістю 0,8 К/хв, 2,0 К/хв та 3,0 К/хв, відповідно.

Вплив зростання швидкості нагрівання на тип втрати кристалізаційної води особливо чітко проявляється на другій стадії дегідратації. Втрата кристалізаційної води на другій стадії дегідратації за швидкості нагрівання 0,8 К/хв завершується за температури 392 К. За швидкості нагрівання 2,0 К/хв та 3,0 К/хв стадія завершується за температур 409 К та 417 К, відповідно. Зростання швидкості нагрівання зразків призводить до значного поглиблення екстремумів на диференційних

кривих та зміщення їх в бік вищих температур. Так, за швидкості нагрівання зразка 0,8 К/хв, максимальній швидкості втрати кристалізаційної води відповідає температура 375 К. За швидкості нагрівання 2,0 К/хв та 3,0 К/хв, максимальній швидкості дегідратації відповідають температури 380 К та 386 К, відповідно. Максимуми ендотермічних ефектів, які проявляються на кривих ДТА за швидкості нагрівання 0,8 К/хв, 2,0 К/хв та 3,0 К/хв, відповідають температурам 376 К, 385 К та 392 К, відповідно.

Таким чином, шляхом проведення термічних досліджень у динамічному режимі за різних швидкостей нагрівання, встановлено закономірності протікання процесу поетапної дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату в різних температурних інтервалах. Проведений аналіз температурних режимів процесу поетапної дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ став основою для вибору температури проведення процесу сушіння та дегідратації фільтраційним методом. Для реалізації процесу обрано температуру 339 К, яка забезпечує значну втрату маси зразка $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ за різних швидкостей нагрівання та збереження кристалічного стану продукту.

Результати досліджень впливу висоти шару заліза (II) сульфат гептагідрату у діапазоні зміни від 30 до 120 мм на час сушіння (за однакової температури (339 К) та швидкості фільтрування теплового агента) представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 7, з яких видно, що зро-

стання висоти шару призводить до збільшення тривалості сушіння, що пояснюється зростанням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованої перегородки.

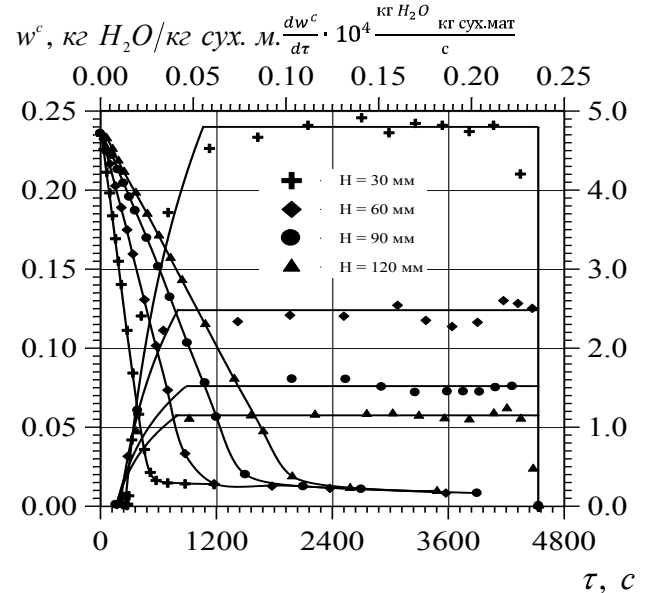


Рис. 7. Кінетичні криві сушіння заліза(II) сульфат гептагідрату за різних висот шару матеріалу та криві швидкості сушіння

Результати досліджень впливу швидкості фільтрування теплового агента крізь шар заліза (II) сульфат гептагідрату на процес фільтраційного сушіння представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 8.

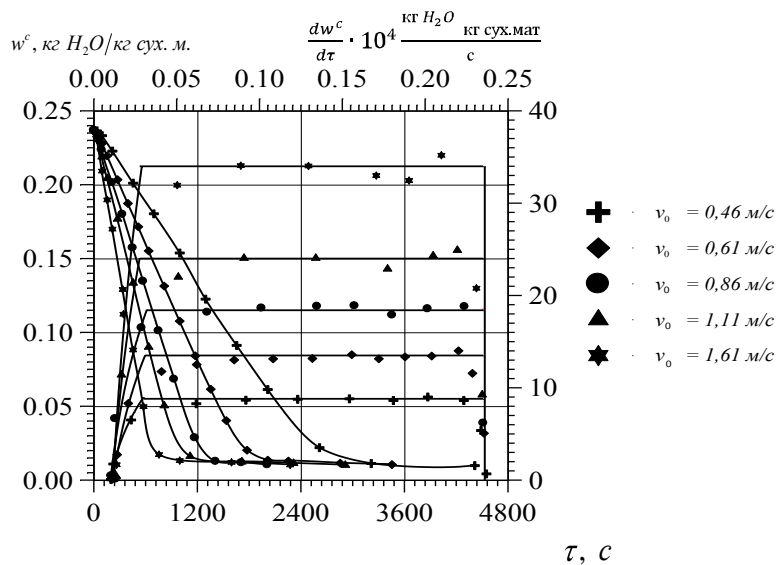


Рис. 8. Кінетичні криві сушіння заліза (II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей фільтрування теплового агента

Збільшення швидкості фільтрування теплового агента (за однакової висоти шару і температури теплового агента (339 К)) призводить до скорочення тривалості сушіння, оскільки збільшується кількість внесеної теплоти в пористий шар матеріалу, зростають коефіцієнти тепло- і масовіддачі, зменшуються товщини гідравлічного, теплового та дифузійного шарів.

Проведені розрахунки енергозатрат на реалізацію процесу фільтраційного сушіння заліза (II) сульфат гептагідрату за різних висот шару матеріалу та швидкостей профільтрування теплового агента дозволили встановити оптимальні параметри $H = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ та $v_0 = 0,86 \text{ м/с}$, за яких енерговитрати є мінімальними.

Висновки

Досліджено гідродинаміку процесу профільтрування теплового агента крізь різні висоти шару заліза (II) сульфат гептагідрату (рис. 1). На основі узагальнення експериментальних даних, отримано розрахункову залежність, що дає змогу теоретично визначати втрати тиску у стаціонарному шарі заліза (II) сульфат гептагідрату в межах досліджуваних висот шару з достатньою точністю, отже, має практичне застосування для прогнозування енергетичних затрат на реалізацію процесу сушіння та дегідратації.

Шляхом проведення термічних досліджень у динамічному режимі за різних швидкостей нагрівання, встановлено закономірності протікання процесу постадійної дегідратації заліза (II) сульфат гептагідрату в різних температурних інтервалах (табл. 1). Для реалізації процесу сушіння та дегідратації $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ з відщепленням перших трьох молекул кристалізаційної води обрано температуру 339 К, яка забезпечує збереження кристалічного стану продукту.

За температури теплового агента 339 К, досліджено кінетику видалення вологи з заліза (II) сульфат гептагідрату за різних висот шару матеріалу (рис. 7) та швидкостей руху теплового агента (рис. 8). Проведені розрахунки енергозатрат на реалізацію процесу фільтраційного сушіння заліза (II) сульфат гептагідрату за різних висот шару матеріалу та швидкостей профільтрування теплового агента дали змогу встановити оптимальні параметри процесу, а саме: $H = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ та $v_0 = 0,86 \text{ м/с}$, за яких енерговитрати є мінімальними.

References

1. Barsukova, H. V., Savchenko-Pererva, M. Y. (2020). Reducing the technogenic load on the environment due to the technical solution for the disposal of iron sulphate. *J. Chem. Technol.*, 28(2), 168–176. <https://doi.org/10.15421/08202802>.
2. Gázquez, M. J., Bolívar, J. P., Garcia-Tenorio, R., Vaca, F. (2009). Physicochemical characterization of raw materials and by-products from the titanium dioxide industry. *J. Hazard. Mater.*, 166, 1429–1440.
3. Huang, P., Deng, S., Zhang, Z., Wang, X., Chen, X., Yang, X., Yang, L. (2015). A sustainable process to utilize ferrous sulfate waste from titanium oxide industry by reductive decomposition reaction with pyrite. *Thermochim. Acta*, 620, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.10.004>.
4. Kruhlova, N. O., Bakhariev, V. S. (2015). Ekologichno bezpechna tekhnolohiia pereroblennia shlamiv vyrobnytstva tytanooksydnykh pihmentiv. *Ecological safety*, 2(20), 69–76.
5. Georgiou, D., Aivazidis, A., Hatiras, J., Gimouhopoulos, K. (2003). Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate. *Water Research*, 37(9), 2248–2250. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00481-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00481-5).
6. Potgieter, H., Horne, K. A., Potgieter, S. S., Wirth, W. (2002). An evaluation of the incorporation of a titanium dioxide producer's waste material in Portland cement clinker. *Mater. Lett.*, 57, 157–163. DOI: 10.1016/S0167-577X(02)00723-1.
7. Kanari, N., Evrard, O., Neveux, N. (2001). Recycling ferrous sulfate via super-oxidant synthesis. *The Journal of The Minerals*, 53, 32–33. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0191-8>.
8. Sobol, Kh. S., Markiv, T. Ye., Sanytskyi, M. A., Kohuch, H. V. (2003). Vplyv aktyvnykh mineralnykh dodatkov na vlastyivosti kompozytsiinykh tsementiv. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Chemistry, Technology of Substances and their Application*, 488, 274–278.
9. Kanari, N., Filippova, I., Diot, F., Mochón, J., Ruiz-Bustanza, I., Allain, E., Yvon, J. (2014). Utilization of a waste from titanium oxide industry for the synthesis of sodium ferrate by gas-solid reactions. *Thermochim. Acta*, 575, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.11.008>.
10. Karpovich, Ye. A., Zarechennyi, V. G. (2001). Vovlechenie v proizvodstvo udobrenii kislogo zhelezного kuporosa. Ekologiya i zdorove cheloveka. Okhrana vodnogo i vozdušnogo basseinov. *Utilizatciia otkhodov*, 2, 396–398.
11. Savchenko-Pererva, M. V., Barsukova, H. Y. (2020). Reducing the technogenic load on the environment due to the technical solution for the disposal of iron sulphate. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28(2), 168–176. <https://doi.org/10.15421/082018>.
12. Yavorskyi, V. T., Kalymon, A. B., Rubai, O. I. (2015). A study of the effect of iron (III) compoundson

oxidation of iron(II) ions by atmospheric oxygen. *The Journal of The Minerals*, 6(76), 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47460>.

13. Glouannec, P., Salagnac, P., Guézenoc, H., Allanic, N. (2008). Experimental study of infrared-convective drying of hydrous ferrous sulphate. *Powder Technology*, 187, 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.03.007>.

14. Yavorsky, V. T., Helesh, A. B., Kalymon, Ya. A., Znak, Z. O. (2014). Ekolohichnyy monitorynh vyrobnytstva chervonoho ferumoksydnoho pihmentu. *Énerhotekhnolohyy y resursoberezhnye*, 3, 46–55.

15. Tong, W., Kenneth, A., Debelak, J., Roth, A. (2007). Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate. *Thermochimica Acta*, 462(1-2), 89–93. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.07.001>.

16. Kindzera D., Hosovskyi R., Atamanyuk V., Symak D. Heat transfer process during filtration drying of grinded sunflower biomass. (2021). *Chem. Chem. Technol.*, 15(1), 118–124. <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.118>.

17. Atamanyuk, V. M., Kochubei, V. V., Kindzera, D. P., Tsiura, N. Y., (2022). Дослідження процесу дегідратації залізо(II) сульфат гептагідрату фільтраційним методом. *Питання хімії та хімічної технології*, 5, 24–32. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2022-1445-24-32>.

18. Kochubei, V., Yaholnyk, S., Bets M., Malovanyy M. (2020). Use of activated clinoptilolite for direct dye-contained wastewater treatment. *Chemistry & chemical technology*, 14(3), 386–393. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.386>.

D. P. Kindzera, V. V. Kochubei, V. M. Atamanyuk, N. Y. Tsiura, A. B. Helesh

Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemistry Engineering

STUDY OF THE INFLUENCE OF REGIME FACTORS ON THE KINETICS OF THE DEHYDRATION PROCESS OF IRON (II) SULFATE HEPTAHYDRATE USING THE FILTRATION METHOD

The filtration method of gradual dehydration of iron (II) sulfate heptahydrate has been proposed. Based on the generalization of experimental data of hydrodynamics, the calculated dependence was obtained, which makes it possible to determine theoretically pressure losses in the stationary layer of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. According to the results of complex thermal analysis, the regularities of the gradual dehydration process of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ have been established in different temperature intervals. The temperature of 339 K has been chosen, to implement the $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dehydration process with the separation of the first three molecules of crystallization water, ensuring the preservation of the crystalline state of the product. The kinetics of moisture removal from $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ at different heights of the material layer and velocities of heat agent movement have been investigated. Based on energy consumption calculations, the optimal parameters of the process were established: the height of the stationary layer $H = 60 \cdot 10^{-3}$ m and the fictitious velocities of the heat agent movement $v_0 = 0,86$ m/s.

Key words: iron(II) sulfate heptahydrate; iron oxide pigments; dehydration process; heat agent; stationary layer; crystallization water; thermal analysis.