

Д. П. Кіндзера¹, В. М. Атаманюк¹, А. Б. Гелеш², Н. Я. Цюра¹

¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії

² Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімії і технології неорганічних речовин
diana.p.kindzera@lpnu.ua

ГІДРОДИНАМІЧНІ ТА КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ЖОВТОГО ЗАЛІЗОКСИДНОГО ПІГМЕНТУ

<https://doi.org/10.23939/ctas2024.01.188>

Запропоновано фільтраційний метод сушіння жовтого залізооксидного пігменту. Наведено основні характеристики стаціонарного шару та експериментальні результати гідродинаміки профільтовування теплового агенту крізь стаціонарний шар пігменту різної висоти, що дають підстави зробити висновок про доцільність застосування фільтраційного методу з огляду на невеликі значення перепадів тиску. Визначено кінетичні закономірності фільтраційного процесу сушіння жовтого залізооксидного пігменту за різних висот шару матеріалу, перепадів тиску та температур теплового агенту, що дають змогу науково обгрунтовано вибирати оптимальні параметри для реалізації процесу у виробничих умовах.

Ключові слова: залізооксидні пігменти; заліза (II) сульфат гептагідрат; гідродинаміка; кінетика процесу сушіння; енергетичні затрати.

Вступ

Аналіз стану світового ринку пігментів свідчить про великий попит споживачів на залізооксидні пігменти, оскільки вони характеризуються високою фарбувальною здатністю, хімічною стійкістю, термічною стабільністю, стійкістю до дії атмосферних чинників, зокрема до дії ультрафіолетового випромінювання, тощо. Найістотнішими галузями застосування залізооксидних пігментів є промисловість будівельних матеріалів (понад 45 %) [1, 2], лакофарбова промисловість, яка використовує пігменти для виробництва фарб, емалей та різноманітних декоративно-захисних покриттів, полімерна, керамічна, гумова та паперова галузі промисловості [3–5], а також підприємства з виробництва оксидних тонерів, каталізаторів та магнітних носіїв [6, 7].

Різноманітність забарвлення залізооксидних пігментів зумовлена вмістом у них оксидів заліза та їх гідратів. Залізо з киснем утворює такі оксиди: заліза (II) оксид FeO, заліза (III) оксид Fe₂O₃ і магнетит Fe₃O₄ – в першому наближенні FeO·Fe₂O₃, або заліза (II) ферит Fe(FeO₂)₂. Прак-

тично всі сполуки заліза забарвлені: наявність катіонів Fe²⁺ зумовлює світлі зелено-жовті кольори, Fe³⁺ – жовтий, червоний та бурий. За одночасної наявності іонів Fe²⁺ та Fe³⁺ забарвлення змінюється від синього до чорного. У групу червоних ферумоксидних пігментів входять пігменти з відтінками від помаранчево-червоного до фіолетового, але їх основою є заліза (III) оксид (Fe₂O₃), а відмінність у забарвленні зумовлена лише фізичними властивостями частинок [8]. Загалом, фізико-хімічні та технічні властивості залізооксидних пігментів (колір чи відтінок, покривна здатність, світлостійкість, інтенсивність тощо) залежать не лише від хімічного складу сполуки, але, більшою мірою, від кристалічної модифікації, форми та розмірів кристалів, які, своєю чергою, залежать від технологічних особливостей їх одержання [7, 9]. Удосконалення використовуваних технологій одержання синтетичних залізооксидних пігментів та впровадження нових технологічних рішень дає змогу отримати пігменти широкої колірної гами з покращеними показниками якості та задовіль-

ного цінового рівня, що забезпечує їх конкурентоспроможність та прогнозований попит на світовому ринку. Отже, синтетичні залізооксидні пігменти – це група продуктів, асортимент якої динамічно розширюється. Розмір світового ринку залізооксидних пігментів у 2020 р. Оцінюють у 2,2 мільярда доларів США, з очікуваним зростанням до 3,2 мільярда доларів США в 2028 р. [10].

Номенклатура залізооксидних пігментів, представлена на українському ринку, складається здебільшого з таких груп: жовті, червоні та чорні. За оцінками експертів, частка вітчизняних залізооксидних пігментів на українському ринку не перевищує 30 % [7]. Українські виробники стикаються з проблемою недосконалої технології виробництва синтетичних залізооксидних пігментів, тому виробляють пігменти із нижчими споживчими характеристиками, менш конкурентоспроможні на світовому ринку.

Споживчі характеристики жовтого залізооксидного пігменту (α -FeO(OH), гетит) хороші, зокрема: світло- та термостійкість, добрі фарбувальні властивості тощо. Його використовують для виготовлення бетонів, тротуарної плитки, штукатурних сумішей, покрівельної черепиці, ґрунтівок, а також виробництва паперових упакувань, гумових, керамічних, скляних та пластмасових виробів, зокрема декоративних шаруватих пластиків тощо. Окрім цього, жовтий пігмент використовують як сировину для отримання, методом прожарювання у відповідних температурних інтервалах, червоного (α -Fe₂O₃, гематит) та чорного (FeO·Fe₂O₃, магнетит) пігментів та магнітного порошку γ -Fe₂O₃.

Що стосується жовтого залізооксидного пігменту, то вітчизняні виробники пропонують пігменти марки Ж–1 або Ж–2 (другого і третього сортів) за дещо нижчою ціною, і то в недостатній кількості, а пігменти марки Ж–0 (першого сорту) виробляють у малих об'ємах [7]. Тому зазвичай попри високий попит на жовтий залізооксидний пігмент у пік будівельного сезону відзначається стійкий дефіцит останнього.

Нині питання щодо удосконалення виконуваних технологій отримання синтетичних жовтих залізооксидних пігментів із прогнозованими характеристиками, збільшення енергоефективності окремих стадій виробничого технологічного про-

цесу, а також рішень, пов'язаних із залученням доступних сировинних ресурсів для їх синтезу, є актуальним завданням.

У результаті багаторічної діяльності підприємств із виробництва пігментного титану оксиду (VI) у відвалах накопичилися мільйони тонн залізного купоросу (Fe (II) сульфату гептагідрату) [11], який є забруднювачем навколишнього середовища. В світовому масштабі близько 1,3 млн т, що становить 40 % загального вмісту заліза у титанових рудах, втрачається [12]. У довоєнний час частка України у світовому виробництві пігментного титану оксиду становила понад 2 % і, відповідно, утворювалась значна кількість відхідного FeSO₄. Під час виробництва однієї тонни пігментного титану (IV) оксиду утворюється ~ 3–5 т кристалічного FeSO₄·7H₂O, 5–6 т гідролізної сульфатної кислоти, яка містить 5,5–6,5 % мас. FeSO₄ [13].

Одним із напрямів раціональної утилізації Fe (II) сульфату гептагідрату є виробництво залізооксидних пігментів, зокрема жовтого залізооксидного пігменту як цільового продукту. Таке технологічне рішення дає змогу знизити техногенне навантаження на навколишнє середовище, пов'язане із накопиченням відходів та їх негативним впливом на довкілля та живі організми, а також вирішити проблему економії сировинних матеріалів.

На вітчизняних заводах із виробництва пігментного TiO₂ для утилізації Fe (II) сульфату гептагідрату, зазвичай, проектують технологічні лінії із виробництва червоного залізооксидного пігменту. Технологічно процес реалізується двома методами: виробництво червоного пігменту (α -Fe₂O₃) через “чорний” (Fe₃O₄) чи “жовтий” (Fe₂O₃·H₂O або α -FeO(OH)). Оскільки метод “червоний через жовтий” дає змогу отримувати червоні пігменти широкого діапазону відтінків від світлих до темних, ці два методи, зазвичай, використовують паралельно. Поєднання вказаних методів у певних технологічних варіаціях дає змогу отримати до семи – восьми сортів червоних пігментів оксиду заліза із різними відтінками та властивостями. Крім того, жовтий і чорний оксиди заліза можуть використовуватися безпосередньо як комерційні продукти, що істотно розширює асортимент продукції та забезпечує гнучкість і конкурентоспроможність на ринку [8].

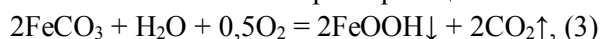
Незважаючи на деякі технічні відмінності, існує кілька загальних стадій промислового виробництва залізооксидних пігментів. Першою стадією є розчинення залізного купоросу ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), яке здійснюється у реакторі, оснащеному пристроями для перемішування і нагрівання розчину гарячою парою до 50–60 °С. В результаті одержують розчин з концентрацією FeSO_4 180–200 г/дм³. Друга стадія – синтез пігментів, має певні особливості. Під час виробництва “червоний через чорний” до попередньо підігрітого до 86–90 °С розчину FeSO_4 додають стехіометричну кількість розчину кальцинованої соди (концентрація 140–160 г/дм³ Na_2CO_3), внаслідок чого випадає світло-зелений осад заліза (II) карбонату



який окиснюють киснем повітря за 86–90 °С протягом 10–12 годин:



Відповідно до способу отримання “червоний через жовтий” цю стадію здійснюють у два етапи. Для цього в розчин FeSO_4 за температур 25–35 °С подають кальциновану соду (Na_2CO_3), 10–30 % від стехіометрії, та протягом 4–6 год розчин окиснюють киснем повітря. На другому етапі розчин нагрівають до 86–90 °С, додають залишок розчину Na_2CO_3 та протягом 8–10 год доокиснюють киснем повітря за реакцією:



На третій стадії – відмивання чорного і жовтого пігментів – здійснюють послідовне репульпування і відстоювання осадів. Для економії води та зменшення втрат цільових продуктів передбачено п’ятистадійне послідовне промивання осаду. Для покращення седиментації частинок осаду на стадії промивання додають 0,02 % розчину поліакриламід (ПАА). Суспензії осаджених чорного і жовтого пігментів, із концентраціями, відповідно, 260–300 г/дм³ та 360–400 г/дм³, подають на стадію фільтрування, яка реалізується за допомогою барабанних вакуум-фільтрів. Утворений фільтрат повертають на стадію промивання, а відфільтровану пасту подають на сушіння для отримання жовтих і чорних пігментів як цільових продуктів, а також подальшого їх прожарювання для виробництва червоних залізооксидних пігментів [8]. Отже, виробництво всіх типів залізооксидних пігментів

можна реалізувати в одному цеху заводу з виробництва пігментного титану (IV) оксиду.

Процес сушіння, необхідний для отримання цільового продукту в порошкоподібному стані без грудкоутворення зі стабілізацією однорідності кольору, є тривалою та найенергоємнішою стадією технологічної лінії виробництва жовтого залізооксидного пігменту, оскільки реалізується із застосуванням енергоємного сушильного обладнання різних типів, а саме: вальцево-стрічкових, барабанних, вакуумних із гребковими мішалками та турбінно-полічкових сушарок. Сушіння пігменту, зазвичай, відбувається за температур, що не перевищують 120 °С, зважаючи на його термостабільність у температурних межах до 150 °С і для отримання необхідного забарвлення. Втрати пігменту на стадії висушування становлять 2–8 %.

Враховуючи вищезазначене, сушіння жовтого залізооксидного пігменту технологічно доцільно здійснювати в режимі фільтраційного сушіння. Суть методу полягає в профільтовуванні теплового агенту крізь пористу структуру матеріалу, розміщеного на перфорованій перегородці, в напрямку “матеріал – перфорована перегородка”, що дає змогу істотно зменшити тривалість процесу сушіння, знизити енергетичні затрати на реалізацію процесу та втрати матеріалу з відпрацьованим тепловим агентом [14, 15]. Розвинена поверхня тепло- і масообміну та високі швидкості руху теплового агенту в каналах стаціонарного шару матеріалу забезпечують високі коефіцієнти тепло- і масовіддачі й, відповідно, високу інтенсивність фільтраційного сушіння [16].

Аналіз результатів досліджень гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар матеріалу, який потрібно зневоднити, дає відповідь на питання щодо доцільності застосування саме фільтраційного способу сушіння. Оскільки, варіюючи технологічні параметри фільтраційного процесу, можна змінювати енергозатрати на реалізацію останнього та інтенсифікувати процес, то для встановлення технологічно доцільних режимних параметрів сушіння потрібно дослідити кінетику процесу за різних геометричних розмірів стаціонарного шару матеріалу та параметрів теплового агенту. Гідродинамічні та кінетичні особливості процесу сушіння жовто-

го залізооксидного пігменту вивчені мало, у випадку застосування фільтраційного методу необхідно встановити вплив режимних параметрів теплового агента на процес, щоб визначити оптимальні та ефективні діапазони для інтенсифікації процесу.

Мета роботи – дослідження характеристик стаціонарного шару жовтого залізооксидного пігменту та основних гідродинамічних та кінетичних закономірностей його сушіння за

різних висот шару матеріалу та параметрів теплового агента для зниження енергозатрат процесу та поліпшення якості продукції.

Матеріали та методи досліджень

Як об'єкт дослідження використано вологий жовтий залізооксидний пігмент (після стадії фільтрування), зразки якого взято на ПАТ “Суміхіпрот”. Головні характеристики товарного продукту наведено в табл. 1 [7].

Таблиця 1

Властивості синтетичного жовтого залізооксидного пігменту [7]

Колір	Хімічний склад (структура)	Густина істинна, кг/м ³	Покривність, г/м ²	Маслоємність, г/100 г	pH водної витяжки	Термостійкість, °C
Жовтий	α-FeOOH (гетит)	3800	12–20	35–70	3,5–7,0	150

Жовтий залізооксидний пігмент (α-FeO(OH)) є полідисперсною сумішшю частинок кутастої форми. Для визначення його дисперсного складу використовували ситовий метод, а отримані результати подали у вигляді гістограми. Усереднений діаметр частинок залізооксидного пігменту обчислено за формулою (1):

$$d_{\text{ср}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}, \quad (1)$$

де x_i – об'ємна або масова частка частинок з діаметром d_i , d_i – середній діаметр частинок відповідної фракції, м.

Для реалізації процесу фільтраційного сушіння з жовтого залізооксидного пігменту формували стаціонарний шар, який характеризувався значенням загальної пористості та еквівалентного діаметра каналів, крізь які профільтрували тепловий агент. Для розрахунку загальної пористості стаціонарного шару ($\varepsilon_{\text{ш}}$, м³/м³) використовували залежність:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{іст}}}\right), \quad (2)$$

де $\rho_{\text{нас}}$ – насипна густина шару матеріалу, кг/м³, визначена як $\rho_{\text{нас}} = G/V$, де G – маса проби, кг; V – об'єм проби в циліндрі, м³; $\rho_{\text{іст}}$ – істинна густина матеріалу, кг/м³ ($\rho_{\text{іст}} = 3800$ кг/м³ [7]).

Еквівалентний діаметр каналів (d_e , м) розраховували із залежності:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_{\text{ш}}}{a}, \quad (3)$$

де a – питома поверхня шару, м²/м³.

Розрахунок питомої поверхні шару жовтого залізооксидного пігменту виконували, беручи до уваги коефіцієнт форми частинок та коефіцієнт взаємного екранування поверхні:

$$a = f_{\text{ум}} \cdot k_e, \quad (4)$$

де k_e – коефіцієнт взаємного екранування, $k_e = 0,7$ [17]; $f_{\text{ум}}$ – умовна питома поверхня шару дисперсного матеріалу, м²/м³, визначена із залежності:

$$f_{\text{ум}} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ш}})}{d_p \cdot \Phi}, \quad (5)$$

де Φ – коефіцієнт форми частинок, $\Phi = 0,7$ [17].

Для дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарні шари жовтого залізооксидного пігменту та кінетики сушіння використано експериментальну установку [18]. Шар належної висоти сформовано в контейнері із перфорованим дном; діаметр отворів менший, ніж діаметр найменших частинок матеріалу. Формування шарів (висота $H = 10$ – 60 мм) уточнювали на основі відомої насипної густини, зважаючи контейнер із матеріалом на електронній вазі AXIS-AD3000 для забезпечення однакової пористості шару. Для досліджень гідродинаміки контейнер з матеріалом під'єднували до ресивера, далі вмикали водокільцевий вакуум-насос і за

допомогою регулювального вентиля встановлювали досліджувані значення витрат теплового агенту крізь стаціонарний шар матеріалу. Витрату теплового агенту визначали за показами витратоміра, а втрати тиску – за показами електронного вакуумметра.

Початковий вологовміст жовтого залізооксидного пігменту визначали за залежністю:

$$\omega^C = \frac{G_n - G_{сyx}}{G_{сyx}}, \quad (5)$$

де ω^C – початковий вологовміст жовтого залізооксидного пігменту, кг H_2O /кг сух. мат; G_n – початкова маса вологого жовтого залізооксидного пігменту, кг; $G_{сyx}$ – маса сухого жовтого залізооксидного пігменту, кг.

Дослідження кінетики процесу сушіння жовтого залізооксидного пігменту здійснювали за різних температур теплового агенту (40, 60, 80, 100 °С); різних висот шару матеріалу (30, 40, 50, 60 мм) та за різних перепадів тисків (16000, 20000, 25000, 35000 Па) і, як результат, – різних швидкостей фільтрування теплового агенту. За допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S встановлювали задану температуру теплового агенту, а за допомогою регулювального вентиля – витрату теплового агенту, яку вимірювали за допомогою електронного витратоміра [18, 19]. Для виконання досліджень контейнер зі сформованим шаром матеріалу відповідної висоти встановлювали на ресивер, вмикали вакуум-насос, відкривали запірний вентиль і сушили пігмент. У ході експерименту визначали зміну маси матеріалу через відповідні проміжки часу (30–60 с) ваговим методом. Сушіння тривало до досягнення матеріалом сталості маси.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати досліджень гранулометричного складу жовтого залізооксидного пігменту ситовим методом відображено на рис. 1 у вигляді гістограми.

Значення основних характеристик шару жовтого залізооксидного пігменту, визначені за залежностями (1)–(4), наведено у табл. 2.

Для зневоднення жовтого залізооксидного пігменту запропоновано фільтраційний метод, суть якого полягає у профільтруванні теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу під дією перепаду тисків. Значення

втрат тиску в шарі матеріалу залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу, висоти стаціонарного шару та швидкості профільтрування теплового агенту. На рис. 2 подано результати дослідження гідродинаміки під час профільтрування теплового агенту крізь пористі шари сухого залізооксидного пігменту заввишки H , м у вигляді графічної залежності втрат тиску ΔP , Па від фіктивної швидкості руху теплового агенту (v_0 , м/с).

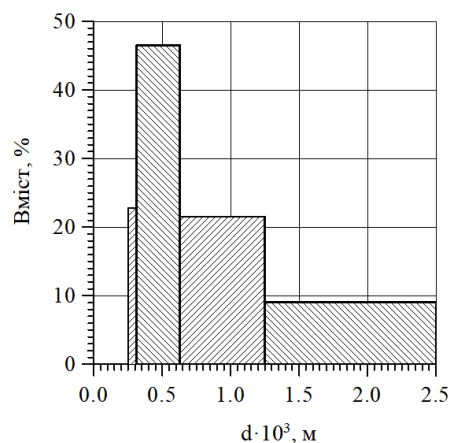


Рис. 1. Гістограма дисперсного складу жовтого залізооксидного пігменту

Таблиця 2

Характеристики шару жовтого залізооксидного пігменту

$d_q \times 10^3$, м	ρ , кг/м ³	ε , м ³ /м ³	a , м ² /м ³	$d_e \times 10^3$, м
0,48	2204	0,42	7355	0,162

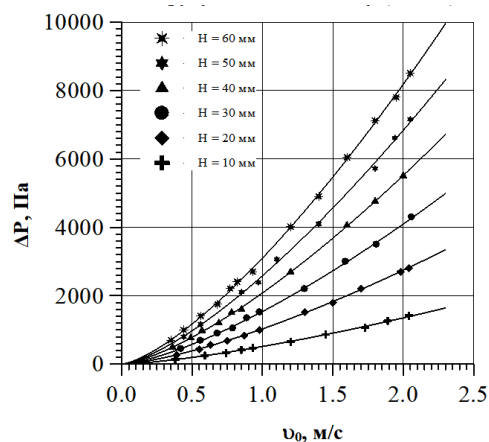


Рис. 2. Залежність втрат тиску (ΔP) від фіктивної швидкості (v_0) руху теплового агенту в стаціонарному шарі жовтого залізооксидного пігменту висотою H

Аналіз графічних залежностей (рис. 2) показує, що за однакової фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту збільшення товщини шару матеріалу призводить до зростання перепаду тисків. Отже, зі збільшенням товщини шару матеріалу від $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м до $H = 60 \cdot 10^{-3}$ м перепад тисків зростає від 1450 Па до 8200 Па за фіктивної швидкості руху теплового агенту 2 м/с. Загалом, в заданому діапазоні швидкостей руху теплового агенту значення перепадів тиску порівняно невеликі, тому дають змогу обґрунтувати доцільність застосування фільтраційного сушіння.

Досліджено зміни вологовмісту жовтого залізооксидного пігменту (початковий вологовміст $\omega^C = 0,26$ кг H_2O /кг сух. мат., визначений згідно із залежністю (5)) в часі за різних висот шару вологого матеріалу, перепадів тиску на сухому матеріалі та температур теплового агенту. Розрахунки затрат теплової енергії для висушування залізооксидного пігменту від початкового вологовмісту до кінцевого за різних висот шару вологого матеріалу, швидкостей фільтрування теплового агенту і температур, виконані згідно із методикою, наведеною у роботі [20], дали змогу встановити параметри: $H = 30 \cdot 10^{-3}$ м; $t = 100$ °С, за яких енергетичні затрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння найнижчі. Тому саме ці параметри використано як базові сталі параметри під час подання результатів кінетичних закономірностей сушіння жовтого залізооксидного пігменту (рис. 3–5).

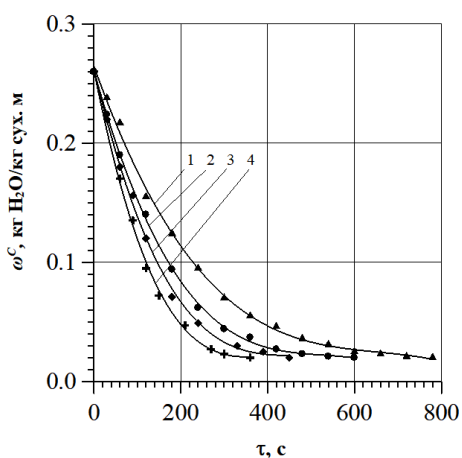


Рис. 3. Кінетичні криві сушіння жовтого залізооксидного пігменту за різних висот шару матеріалу: 1 – $H = 60$ мм, 2 – $H = 50$ мм, 3 – $H = 40$ мм, 4 – $H = 30$ мм ($t = 100$ °С, $\Delta P = 35000$ Па)

Результати досліджень впливу висоти шару жовтого залізооксидного пігменту в діапазоні зміни 30–60 мм на час сушіння (за однакової температури та перепаду тисків) наведено у вигляді графічних залежностей на рис. 3, з яких видно, що зростання висоти шару призводить до збільшення тривалості сушіння, що пояснюється зростанням кількості вологи, що міститься в шарі, та збільшенням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованої перегородки.

Результати досліджень впливу перепадів тисків на сухому матеріалі (як результат – швидкості фільтрування теплового агенту) на процес фільтраційного сушіння жовтого залізооксидного пігменту подано у вигляді графічних залежностей на рис. 4. Збільшення перепаду тисків (за однакових висоти шару і температури теплового агенту) сприяє зменшенню тривалості сушіння, оскільки збільшується кількість теплоти, внесеної в пористий шар матеріалу за одиницю часу, що приводить до інтенсифікації процесу внаслідок зростання коефіцієнтів тепло- і масовіддачі між тепловим агентом та частинками матеріалу.

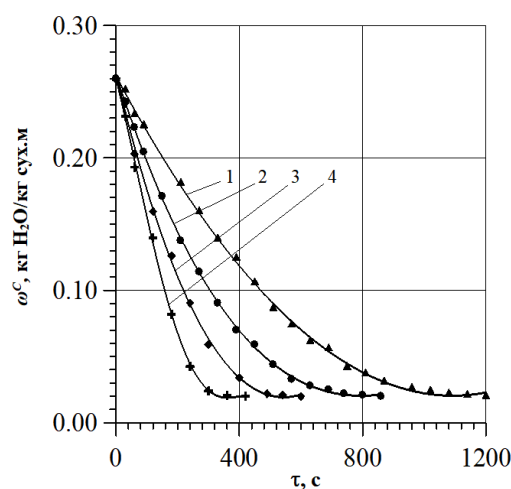


Рис. 4. Кінетичні криві сушіння жовтого залізооксидного пігменту за різних перепадів тисків по сухому матеріалу: 1 – $\Delta P = 16000$ Па, 2 – $\Delta P = 20000$ Па, 3 – $\Delta P = 25000$ Па, 4 – $\Delta P = 35000$ Па ($H = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $t = 100$ °С)

Результати досліджень впливу температури теплового агенту t (за однакових висоти шару і перепаду тисків) на тривалість фільтраційного сушіння жовтого залізооксидного пігменту наведено у вигляді графічних залежностей на рис. 5.

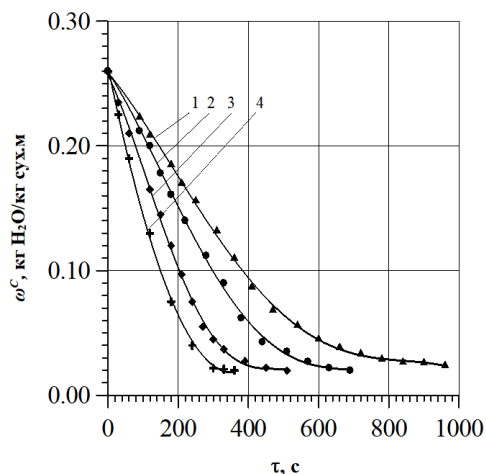


Рис. 5. Кінетичні криві сушіння залізооксидного пігменту за різних температур теплового агенту:
 1 – $t = 40^\circ\text{C}$, 2 – $t = 60^\circ\text{C}$, 3 – $t = 80^\circ\text{C}$,
 4 – $t = 100^\circ\text{C}$ ($H = 30 \cdot 10^{-3}\text{ м}$)

Зменшення тривалості сушіння зі збільшенням температури теплового агенту пояснюється зростанням сушильного потенціалу останнього, а також збільшенням коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи із частин матеріалу.

Одержані кінетичні закономірності фільтраційного процесу сушіння жовтого залізооксидного пігменту за різних висот шару матеріалу, перепадів тиску та температур теплового агенту дають змогу науково обґрунтовано вибрати оптимальні параметри для реалізації процесу у виробничих умовах. Запропонований метод фільтраційного сушіння дасть змогу не лише скоротити тривалість процесу висушування жовтого залізооксидного пігменту, але й зменшити енергетичні затрати на його реалізацію та мінімізувати втрати матеріалу, оскільки всі найдрібніші частинки залишаються в шарі й не виносяться з нього тепловим агентом.

Висновки

На підставі критичного аналізу джерел інформації встановлено, що потреби вітчизняних галузей промисловості у залізооксидних пігментах можна задовольнити, залучивши у сферу виробництва $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, який є великотоннажним відходом виробництва пігментного TiO_2 . Крім того показано, що, змінюючи технологічний режим синтезу залізооксидних пігментів, можна отримати товарні продукти широкої колірної гами, що збільшує гнучкість виробництва та його конкурентоздатність.

Визначено основні фізико-механічні характеристики стаціонарного шару жовтого залізооксидного пігменту, а саме: усереднений діаметр частинок, насипну густину, пористість шару, питому поверхню, еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент.

У результаті експериментальних досліджень гідродинаміки фільтраційного сушіння жовтого залізооксидного пігменту встановлено, що гідравлічний опір рухові теплового агенту (за фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту 2 м/с і висоти шару $H = 60 \cdot 10^{-3}\text{ м}$) не перевищує 8200 Па , що, загалом, свідчить про доцільність застосування запропонованого енергозбережного методу сушіння.

Визначені кінетичні закономірності фільтраційного процесу сушіння жовтого залізооксидного пігменту за різних висот шару матеріалу (рис. 3), перепадів тиску (рис. 4) та температур (рис. 5) дадуть змогу науково обґрунтовано вибрати оптимальні параметри реалізації процесу та слугуватимуть підґрунтям для його математичного опису.

References

1. Saade, J., & Assaad, J. J. (2022). Effect of Pigments on Structural Properties of Colored Reinforced Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering Materials*, 11(1), 20210075. <https://doi.org/10.1520/acem20210075>
2. Porto, T. R., Lopes Lucena, A. E. d. F., de Moraes, T. M. R. P., Melo Neto, O. d. M., Costa, D. B., de Sousa Carvalho, F. d. S., & Torres, P. R. B. (2022). The use of iron oxide in asphalt mixtures to reduce the effects of urban heat islands. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01709. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01709>
3. Lemos, MZ., Jaeger, S., Balaba, N., et al. (2023). Synthesis and characterization of iron oxides and their application as inorganic pigments in white paint. *Coloration Technology*, 1–13. <https://doi.org/10.1111/cote.12735>
4. Xu, M., Pan, G., Guo, Y., Yang, S., & Fang, Z. (2021). Surface modification and structure analysis of coated iron oxide yellow pigments to improve dispersion in organic solvents. *Surface and Interface Analysis*, 53(11), 933–945. <https://doi.org/10.1002/sia.6995>
5. Fiuza T. E. R., Borges J. F. M., Cunha J. B. Md., et al. (2018). Iron-based inorganic pigments from residue: Preparation and application in ceramic, polymer, and paint. *Dyes Pigments*, 148, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.09.025>
6. Pfaff, G. (2022). The world of inorganic pigments. *ChemTexts*, 8, 2–17. <https://doi.org/10.1007/s40828-022-00166-1>

7. Vasylenko, I. A., & Pivovarov, O. A. (2016). 217. *Zalizoosydni pihmenty. Syntez, modyfikuvannya, vykorystannya u riznykh haluzyakh nauky i tekhniki: monohrafiya*. Dnipropetrovs'k: Aktsent PP, 217 p.
8. Yavors'kyi, V. T., Helesh, A. B., Kalymon, Ya. A., & Znak, Z. O. (2014). Ekolohichnyy monitorynh vyrobnytstva chervonoho ferumoksydnoho pihmenta. *Enerhotekhnolohiyi ta resursozberezhennya*, 3, 46–55. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127293>
9. Dos Santos, I. S. F., Edwards, H. G. M., & de Faria, D. L. A. (2023). Hematite colour revisited: Particle size and electronic transitions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 123810. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123810>
10. Iron Oxide Pigments Market Size, Share & Trends (2020). *Analysis Report By Product (Synthetic, Natural), By Color (Red, Yellow, Black, Blends), By Application (Construction, Coatings, Plastics, Paper), And Segment Forecasts, 2021–2028*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/iron-oxide-pigment-market>
11. 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. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28(2), 168–176. <https://doi.org/10.15421/082018>
12. Jiffin Sam, Kirankumar, P. S., Sanatha, K., Prathish, K. P. (2021). Development of saleable chloride free iron oxide from hazardous waste in titanium industries via layered double hydroxide formation. *Journal of Environmental Management*, 290, 112566. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112566>
13. Kalymon, Y., Helesh, A., Yavorskyi, O. (2012). Hydrolytic sulphate acid evaporation by waste gases from burning furnaces of meta-titanic acid paste. *Chemistry and Chemical Technology*, 6(4), 423–429, <https://doi.org/10.23939/chcht06.04.423>.
14. Kindzera, D. P., Kochubey, V. V., Atamanyuk, V. M., Tsyura, N. Ya., & Helesh, A. B. (2023). Doslidzhennya vplyvu rezhymnykh faktoriv na kinytyku protsesu dehidratsiyi zaliza (II) sul'fat heptahidratu fil'tratsiynym metodom. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 6(1), 110–117. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.01.110>
15. Atamanyuk, V. M., Kochubei, V. V., Kindzera, D. P., Tsiura, N. Y. (2022). Doslidzhennya protsesu dehidratsiyi zalizo(II) sul'fat heptahidratu fil'tratsiynym metodom. *Pytannya khimiyi ta khimichnoyi tekhnolohiyi*, 5, 24–32. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2022-144-5-24-32>
16. Kindzera, D., Hosovskyi, R., Atamanyuk, V., & Symak, D. (2021). Heat Transfer Process During Filtration Drying of Grinded Sunflower Biomass. *Chemistry & Chemical Technology*, 15(1), 118–124. <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.118>
17. Atamanyuk, V. M., Khanyk Ya. M. (2007). Klasyfikatsiya dyspersnykh materialiv, yak ob'yektiv sushynnya fil'tratsiynym metodom. *Khimichna promyslovist' Ukrainy*, 3, 37–45.
18. Tsiura, N., Kindzera, D., Huzova, I., Atamanyuk, V. (2021). Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. *ScienceRise*, (1), 11–21. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.001583>
19. Mitin I., Kindzera D., Atamanyuk V. (2021). Application of slag from thermal power plant for the production of porous filler. *Journal Environmental Problems*, 6(2), 110–116. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2021.02.110>
20. Atamanyuk V. M., Terlych A. I., Khalaniya O. M. (2016). Fil'tratsiyne sushynnya pyvnoyi drobyny – vidkhodiv pyvovarnoho vyrobnytstva. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy*, 26.8, 264–270.

D. P. Kindzera¹, V. M. Atamanyuk¹, A. B. Helesh², N. Y. Tsiura¹

Lviv Polytechnic National University,

¹ Department of Chemistry Engineering

² Department of Chemistry and Technology of Inorganic Substances

HYDRODYNAMIC AND KINETIC PATTERNS OF YELLOW IRON OXIDE PIGMENT FILTRATION DRYING

The filtration drying method of the yellow iron oxide pigment has been proposed. The main characteristics of the stationary layer and the experimental results of the hydrodynamics of filtering the heat agent through the stationary layer of pigment of different heights have been presented, which allows us to conclude the application feasibility of the filtration method by taking into account insignificant values of pressure drops. The obtained kinetic regularities of the yellow iron oxide pigment filtration drying process at different heights of the material layer, pressure drops, and temperatures of the heat agent, make it possible to select, in a scientifically based way, the optimal parameters for the process implementation in the production conditions.

Key words: iron oxide pigments; iron (II) sulfate heptahydrate; hydrodynamics; kinetics of the drying process' energy costs.