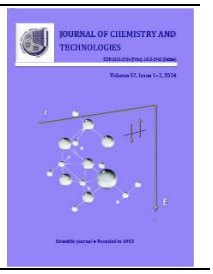
Journal of Chemistry and Technologies, 2024, *32*(1), 183-190

Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: http://chemistry.dnu.dp.ua
editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 546.723-31:537.622.6:544.478-03:544.723.2

OPTIMIZATION OF THE WASTEWATER PURIFICATION PROCESS FROM ORGANIC DYES USING THE FERRITE COMPOSITE

Vita V. Datsenko*, Elina B. Khobotova
Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslav Mudry Str., Kharkiv, 61002, Ukraine
Received 12 November 2023; accepted 15 January 2024; available online 25 April 2024

Abstract

The relevance of the work is related to the solution of environmental problems arising from an increase in the amount of industrial waste water contaminated with organic dyes. The aim of the work was to optimize the process of wastewater treatment from organic dyes – methylene blue, methylviolet and Congo red, when using copper-zinc ferrite, taking into account the change in its mechanism over time and varying the process parameters: the concentration of dye solutions or ferrite mass. Quantitative kinetic characteristics of the process of cleaning solutions from organic dyes with a ferrite composite material of the composition $Zn_{0.875}Cu_{0.1}Fe_{4.42}O_4$ at various mass ratios *n* = "ferritic composite material: organic dye" are determined. It was proved that the purification of wastewater from organic dyes proceeds through the mechanisms of photocatalytic transformations and sorption and the kinetic characteristics of photocatalytic processes are an order of magnitude higher than those for the adsorption of dyes. An experimental database on wastewater treatment from dyes was created for each mechanism separately. The kinetic equations for the dependence of the concentration of dyes on time and the ratio *n* are calculated. The cleaning process was optimized for one or two process mechanisms progress while varying the process time, the initial dye concentration or ferrite mass, depending on the need to achieve certain process rates and the depth of cleaning. A scheme of a method for optimizing the process of wastewater treatment from organic dyes using a copper-zinc ferrite composite is proposed. The results are aimed at improving the efficiency and completeness of the purification process. A significant increase in the economic effect of the introduction of the cleaning process is predicted, since it is proposed to use waste from galvanic production for the production of copper-zinc ferrites.

Key words: purification; wastewater; optimization; organic dyes; ferrite; kinetic equations; photocatalysis; sorption.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ВІД ОРГАНІЧНИХ БАРВНИКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЕРИТНОГО КОМПОЗИТУ

Віта В. Даценко, Еліна Б. Хоботова
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна

Анотація

Актуальність роботи пов'язана з вирішенням екологічних проблем, виникаючих при збільшенні кількості стічних промислових вод, забруднених органічними барвниками. Мета роботи полягала в оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників – метиленового синього, метилвіолету і Конго червоного, за допомогою мідно-цинкового фериту при урахуванні зміни у часі його механізму і варіюванні параметрів процесу: концентрації розчинів барвників або маси фериту. Визначено кількісні кінетичні характеристики процесу очищення розчинів від органічних барвників феритним композитним матеріалом складу $Zn_{0.875}Cu_{0.1}Fe_{4.42}O_4$ за різних масових співвідношень *n* = «феритний композитний матеріал : органічний барвник». Доказано, що очищення стічних вод від органічних барвників протікає за механізмами фотокаталітичних перетворень і сорбції і кінетичні характеристики фотокаталітичних процесів на порядок вищі за аналогічні показники для адсорбції барвників. Створено експериментальну базу даних щодо очищення стічних вод від барвників за кожним механізмом окремо. Розраховано кінетичні рівняння залежності концентрації барвників від часу і співвідношення *n*. Процес очищення оптимізовано за протіканням одного або двох механізмів процесу при варіюванні часу процесу, вихідної концентрації барвника або маси фериту залежно від необхідності досягнення певних швидкості процесу і глибини очищення. Запропоновано схему способу оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників за допомогою мідно-цинкового феритного композиту. Результати спрямовані на підвищення ефективності та повноти проведення процесу очищення. Прогнозується значне збільшення економічного ефекту при запровадженні процесу очищення, оскільки для виробництва мідно-цинкових феритів пропонується використовувати відходи гальванічного виробництва.

Ключові слова: очищення; стічні води; оптимізація; органічні барвники; ферит; кінетичні рівняння; фотокаталіз; сорбція.

**Corresponding author: e-mail: dacenkovita14@gmail.com*
© 2024 Oles Honchar Dnipro National University;
doi: 10.15421/jchemtech.v32i1.290728

Journal of Chemistry and Technologies, 2024, *32*(1), 183-190

Вступ

У даний час забруднення води синтетичними барвниками викликає зростаючу екологічну занепокоєність, оскільки багато барвників здійснюють канцерогенний вплив на людей і гідробіонтів [1]. Обсяги використання органічних барвників (ОБ) у промисловості постійно збільшуються, та, відповідно, збільшується кількість стічних вод, забруднених барвниками. Наприклад, об'єм стічних вод з кожної стадії текстильної операції складає приблизно 50.0 л/кг продукту [2]. Небезпечні ОБ як забруднювачі зазвичай є результатом викидів таких виробництв як текстильна, поліграфічна, паперово-целюлозна, нафтопереробна, металургійна, виробництво фарб, фармацевтичних препаратів, засобів захисту рослин, тощо [3]. Органічні барвники залишаються стабільними в різних умовах завдяки синтетичному походженню і складній ароматичній структурі та не піддаються біологічному розкладанню. Тому проблема очищення забруднених стічних вод від ОБ становить першорядний інтерес у всьому світі [4].

Дуже важливим є розвиток новітніх технологій очищення стічних вод. Наразі існує багато методів очищення стічних вод від ОБ, включаючи: фотокаталітичну деградацію [5; 6]; коагуляцію [7; 8]; електрохімічні процеси [9]; хімічне окиснення [10]; мембранну фільтрацію [11]; біологічне очищення [12]; адсорбцію [13].

Процеси адсорбції ефективні у очищенні стічних вод від органічних домішок різного походження[3, 14–16]. У якості адсорбентів застосовують ті матеріали, які на належному рівні знебарвлюють стічні води, а саме: активоване вугілля, відпрацьовані іоніти, глину, каолін, тощо [15]. Останнім часом великого поширення набуває використання технології видалення ОБ із стічних промислових вод за допомогою феритних композитів (ФК) [5; 6; 17–21]. У огляді [17; 18] узагальнено відомості останніх публікацій про видалення аніонних та катіонних ОБ різними нанокомпозитними матеріалами та проведено порівняння їх адсорбційних здатностей. Визначено, що процес адсорбції є перспективним методом, розглянуті нанокомпозити мають високу здатність для видалення ОБ навіть низької концентрації. Відзначено [18], що частка деградації метилового червоного з використанням фотоелектроду WO_3 досягає 97 % за умови освітлення видимим світлом через 160 хв. Кількісні показники мінералізації підтверджено аналізами ХПК (хімічне потрапляння кисню) та ТОС (вміст загального органічного Карбону).

Чисті та композитні нікелеві ферити, що синтезовані методом співосадження, виявили по відношенню до барвників аніонної та катіонної природи сорбційні властивості, вивчена кінетика адсорбційного процесу, розраховані значення питомої та граничної адсорбції за різних вихідних концентрацій та тривалості процесу [19]. Отримано [16; 20] експериментальні дані з вивчення впливу pH розчину, кількості адсорбенту, часу контакту та початкової концентрації компонентів на процес адсорбції ОБ. Ефективність очищення імітованих стічних вод від ОБ за використання ФК становить 80–97 %. Визначені термодинамічні параметри доказують, що видалення ОБ є мимовільним, сприятливим та екзотермічним процесом фізичної адсорбції [16]. Однак вивчення механізму адсорбції композитним матеріалом UiO-66 доводить [21], що процес адсорбції родаміна В в основному здійснюється шляхом хемосорбції на однорідній поверхні, й максимальна адсорбційна ємність становить 188.7 мг/г. Трикомпонентні мідно-цинкові ферити виявляють властивості суперпарамагнетіка, фотокаталізатора і адсорбенту, а очищення стічних вод від ОБ здійснюється у супроводі фотодеградаційних і сорбційних процесів на поверхні ФК [22; 23]. Показано [24], що ФК можна отримати як методами співосадження, так і з використанням промислового відходу – мідно-цинкового гальванічного шламу.

Таким чином, феритні матеріали перспективні в процесах очищення стічних вод, вони мають високу здатність до видалення та розкладання органічних барвників завдяки своїй багатофункціональності, водостійкості, великій площі поверхні, регульованому розміру пор. Тому вивчення властивостей нових феритних матеріалів у очищенні стічних вод є актуальною задачею.

Мета роботи полягала в оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників метиленового синього (МС), метилвіолету (МВ) і Конго червоного (КЧ) за допомогою мідно-цинкового фериту з урахуванням зміни у часі його механізму і

Journal of Chemistry and Technologies, 2024, *32*(1), 183-190

варіюванні параметрів процесу: концентрації розчинів барвників або маси фериту.

Матеріали та методи дослідження

Сорбційну активність ФК досліджували у процесах сорбції органічних барвників МС, МВ, КЧ. Вибрані для експерименту ОБ розрізняються за своєю природою та фізико-хімічними властивостями. Метилвіолет (МВ) і Конго червоний (КЧ) є кислотно-основними індикаторами зі стійким забарвленням у лужній ділянці pH, тобто у середовищі досліджуваних розчинів у процесі обробки феритами. МВ – катіонний, а КЧ – аніонний барвник, азобарвник. Метиленовий синій (МС) – це основний тіазиновий барвник, окисно-відновний індикатор, чутливий до зміни pH та іонної сили розчину. Очищення водних розчинів від ОБ проводили у статичному контакті «ФК-ОБ» тривалістю 1–24 годин. Експериментальним методом дослідження був спектрофотометричний. За допомогою спектрофотометра SPEKOL 11 визначали концентрації МС, МВ (λ = 620 нм) та КЧ (λ = 500 нм) відносно дистильованої води. Концентрації барвників визначали за попередньо побудованими калібрувальними кривими залежності оптичної густини розчинів *D* від їх концентрації. Межа допустимої похибки становить 5 %.

Статистичну обробку експериментальних даних проводили методами параметричної статистики [25]. Із серії вимірювань знаходили середнє арифметичне (1):

$$\acute{x} = \sum_i^n x_i / n, \quad (1)$$

де *n* – число вимірювань.

Визначали відхилення від середнього ($\acute{x}$-x_i) та розраховували суму квадратів відхилень від середнього $\sum_i^n (\acute{x}\text{-}x_i)^2$. Середню квадратичну похибку σ знаходили за формулою (2):

$$\sigma = \pm\sqrt{\frac{\sum_i^n (\acute{x}-x_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

Використовуючи величини σ, розраховували точність результату (3):

$$\delta = \pm\frac{\sigma\cdot\tau_{\alpha\text{-}0.95}}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

де: $t_{\alpha-0.95}$ – коефіцієнт Стьюдента-Фішера, взятий для достовірності даних 95 % та числі ступенів свободи (4):

$$f = n - 1. \quad (4)$$

Кількість вимірювань лежала в межах 3–5.

Довірчий інтервал (δ) обчислювали для всіх вимірюваних величин.

Результати та їх обговорення

Кінетичні особливості процесу очищення водних розчинів від ОБ феритним композитним матеріалом $Zn_{0.875}Cu_{0.1}Fe_{4.42}O_4$ за різних масових співвідношень «ФК : ОБ». Знання кінетичних особливостей очищення водних розчинів від ОБ може бути спрямоване на підвищення ефективності та повноти проведення цих процесів. З цією метою визначено кількісні кінетичні характеристики процесу очищення розчинів від барвників МС, МВ, КК феритним композиційним матеріалом ФК складу $Zn_{0.875}Cu_{0.1}Fe_{4.42}O_4$ за різних масових співвідношень *n* = «ФК : ОБ». Для визначення порядку реакції використано графічний метод, а саме експериментальні дані щодо зміни концентрації ОБ у часі представляли в таких координатах, щоб залежність була прямолінійною. Перший порядок процесу очищення підтверджується лінійністю графічних залежностей у координатах $\ln C_0/C = f(\tau)$ у різні інтервали часу. Як приклад, на рис. 1 наведено кінетичні характеристики процесу очищенні розчинів МС у часі при різних масових співвідношеннях *n*.

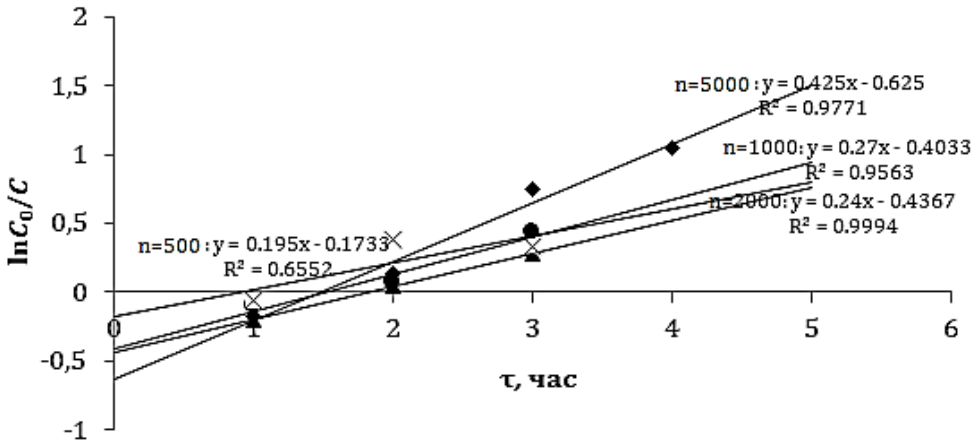


Fig. 1. Kinetic characteristics of the MB FC purification process over timeat different mass ratios *n*

Рис. 1. Кінетичні характеристики процесу очищення МС ФК у часі при різних масових співвідношеннях *n*

Journal of Chemistry and Technologies, 2024, *32*(1), 183-190

Як доказ дотримання законів кінетики першого порядку протягом певного часу, наведено тимчасову залежність концентрації барвника МВ при очищенні розчину за допомогою фериту у напівлогарифмічних координатах (рис. 2).

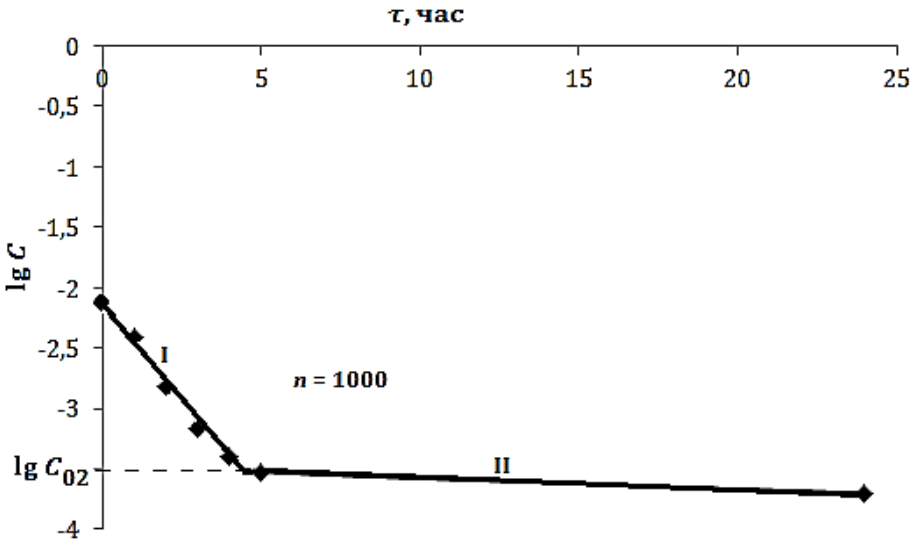


Fig. 2. Dependence of lgC_{MV} on time when using FC with n = 1000
Рис. 2. Залежність lg$C_{МВ}$ від часу при використанні ФК з n = 1000

Наявність двох прямолінійних ділянок (рис. 2) із різним кутом нахилу свідчить про зміну механізму процесу. На початковому етапі очищення (ділянка I) істотну роль відіграє масоперенесення на межі розділу фаз та переважання фотокаталітичних взаємодій фериту та барвників. Зазначено різке зниження концентрації барвників протягом 5 годин. Ділянка II з плавним зменшенням концентрації барвника в інтервалі часу 5–24 год характеризує переважний перебіг адсорбції.

Результати обробки кінетичних кривих процесу очищення розчинів для механізму фотокаталізу та адсорбції моделями хімічної кінетики представлені в таблиці.

Table

Rate constants and kinetic equations of the processes of cleaning solutions from OD using ferrite with the predominance of photocatalytic transformations (section I) and adsorption (section II)

Таблиця

Константи швидкості та кінетичні рівняння процесів очищення розчинів від ОБ за допомогою фериту при переважанні фотокаталітичних перетворень (I ділянка) та адсорбції (II ділянка)

Переважні фотокаталітичні перетворення (I ділянка)		Переважані процеси адсорбції (II ділянка)	
***n*, мг/г**	***k*, год$^{-1}$**	***n*, мг/г**	***k*, год$^{-1}$**
		МС	
500	0.195	-	-
1000	0.27	1000	0.06616
2000	0.24	2000	0.048
3000	–	3000	–
5000	0.425	5000	0.0445
$k_{сер1}$, год$^{-1}$	0.2825	$k_{сер2}$, год$^{-1}$	0.0529
$\tau_{сер1}$, год	2.4531	$\tau_{сер2}$, год	13.1002
Кінетичне рівняння	$C_1=C_{01}\cdot e^{-0.28t}$	Кінетичне рівняння	$C_2=C_{02}\cdot e^{-0.0529t}$
		МВ	
-	-	50	0.0026
-	-	100	0.0198
500	0.413	500	0.0519
1000	0.606	1000	0.0285
2000	0.507	2000	0.0085
3000	0.318	3000	0.0559
5000	0.309	5000	0.1207
$k_{сер1}$, год$^{-1}$	0.4306	$k_{сер2}$, год$^{-1}$	0.0476
$\tau_{сер1}$, год	1.6094	$\tau_{сер2}$,год	14.5588
Кінетичне рівняння	$C_1=C_{01}\cdot e^{-0.43t}$	Кінетичне рівняння	$C_2=C_{02}\cdot e^{-0.0476t}$

Journal of Chemistry and Technologies, 2024, *32*(1), 183-190

Продовження таблиці

		Залежність C_{02} від n	$C_{02} = C_{01}\cdot 0.8456\cdot e^{-0.00259n}$
		КЧ	
500	0.055	500	0.0047
1000	0.111	1000	0.0016
2000	0.163	2000	0.008
3000	0.109	3000	0.0196
5000	0.2	5000	0.0042
$k_{сер1}$, год$^{-1}$	0.1276	$k_{сер2}$, год$^{-1}$	0.0076
$\tau_{сер1}$, год	5.431	$\tau_{сер2}$, год	91.1842
Кінетичне рівняння	$C_1=C_{01}\cdot e^{-0.13t}$	Кінетичне рівняння	$C_2=C_{02}\cdot e^{-0.0076t}$
-	-	Залежність C_{02} від n	$C_{02}= C_{01}0.671\ e^{126.4/n}$

Швидкість процесу очищення розчину від барвників залежить від величини n, що пояснюється зміною площі поверхні поділу фаз на разі варіювання маси фериту. У таблиці представлені усереднені величини $k_{сер1}$ та $k_{сер2}$, на підставі яких розраховані періоди напівперетворення $\tau_{сер1}$ та $\tau_{сер2}$ за співвідношенням:

$$\tau = \frac{0.693}{k}.$$

Кінетичні рівняння, подані в таблиці, дають можливість розрахувати концентрацію барвників та швидкість процесу очищення розчину у різні інтервали часу.

Зареєстровано найбільшу фотокаталітичну активність фериту по відношенню до МВ. Значення $\tau_{сер1}$ для МС менше аналогічних показників для МВ в ~ 1.5 рази, а для КЧ – у 3.4 рази, що пов'язано з аніонним характером КЧ та відштовхуванням його аніону від негативно зарядженої поверхні фериту.

Порівняльний аналіз даних таблиці показує, що кінетичні характеристики фотокаталітичних процесів за участю фериту на порядок вищі за аналогічні показники для адсорбції барвників ($k_{сер1} > k_{сер2}$). Зменшення швидкості фотокаталітичних перетворень барвників у часі пов'язане із зміною поверхні фериту, екрануванням її шаром барвника в ході адсорбції. У результаті фотогенеровані активні частинки не можуть мігрувати далеко від центрів їхнього утворення, що призводить до різкого зниження швидкості фотопроцесів.

Процеси сорбції в очищенні водних розчинів від ОБ феритним композиційним матеріалом $Zn_{0.875}Cu_{0.1}Fe_{4.42}O_4$. Адсорбція описується кінетичними рівняннями першого порядку. Швидкість адсорбції невелика і практично однакова для всіх барвників: $k_{сер2}$ = 0.008–0.07 год$^{-1}$. Слід відзначити, що значення $\tau_{сер2}$ для адсорбції значно більше $\tau_{сер1}$ для фотокаталізу. Швидкість адсорбції МС та МВ вища, ніж КЧ, у 6 разів.

Залежно від початкової концентрації барвника C_{01} змінюватиметься і величина концентрації C_{02}, що визначає максимальну кількість барвника, яку може адсорбувати ферит за заданої величини n. Величина C_{02} визначається у точці перетину екстрапольованої ділянки II з віссю ОУ (рис. 2).

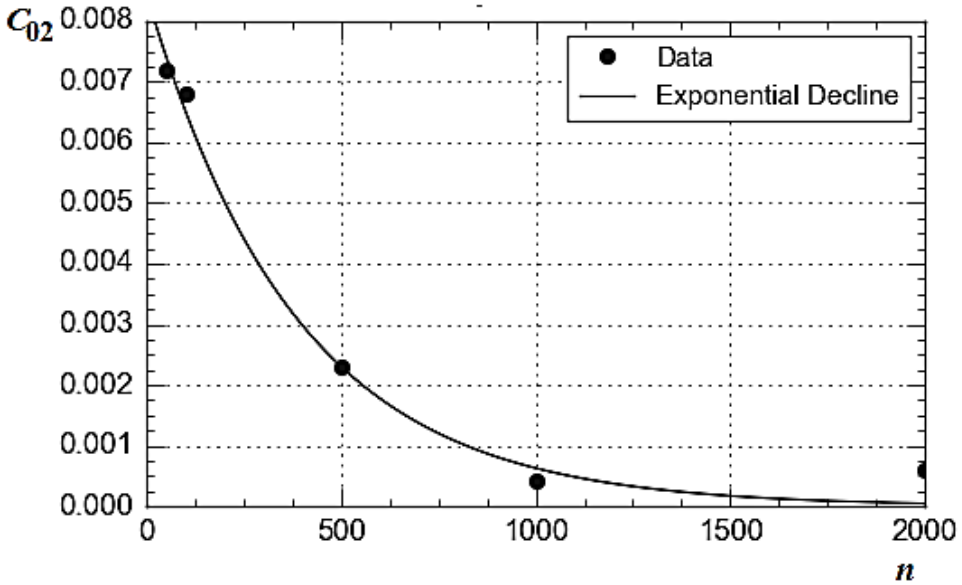


Fig. 3. Exponential model of the dependence of C_{02} on n when purifying the MV solution using FC
Рис. 3. Експоненціальна модель залежності C_{02} від n при очищенні розчину МВ за допомогою ФК

Journal of Chemistry and Technologies, 2024, *32*(1), 183-190

На підставі отриманих експериментальних даних (рис. 3) виведено залежності C_{02}–n. Використане кросплатформне рішення для апроксимації кривих та аналізу даних CurveExpert Professional за нелінійної підгонці моделі. Отримані нелінійні моделі C_{02}–n мають експоненційний характер та описуються рівняннями:

– за очищення розчинів від МВ – $C_{02} = C_{01} 0.8456 \cdot e^{-0.00259n}$, ілюструється рис. 3 (крива отримана за стандартної похибці $3.99 \cdot 10^{-4}$ та коефіцієнті кореляції 0.995);

– за очищення розчинів від КЧ – $C_{02} = C_{01} 0.671\ e^{126.4/n}$.

Проведено розрахунки оптимального часу контакту фериту з розчинами барвників, що очищуються. Якщо розчин треба очистити від МВ з досягненням ефективності 85 %, то це означає, що $C_{МВ} = 0.15 C_{0МВ}$. Припустимо, що це зменшення концентрації барвника відповідає І ділянці ламаної (рис. 2). Використовуємо рівняння $C_{1МВ} = C_{01МВ} \cdot e^{-0.43t}$ для розрахунку часу протікання процесу:

$$0.15 = e^{-0.28t} \text{ або } t = \frac{-\ln 0.15}{0.43} = 4.4 \text{ год.}$$

Цей час дійсно відповідає І ділянці ламаної (рис. 2). Таким чином, експериментальна база даних дозволяє з великою точністю визначити важливий параметр процесу – час контакту фериту і розчину без проведення додаткових аналізів та зі своєчасним звільненням відстійників для нових порцій стічних вод.

Спосіб оптимізації процесу очищення стічних вод від ОБ. Враховуючи визначені кінетичні особливості процесу очищення водних розчинів від ОБ з використанням ФК запропоновано схему способу оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників за допомогою мідно-цинкового фериту (рис. 4). З технологічного циклу 1 стічні води, що містять органічні барвники, подають на дослідження 2 для поповнення експериментальної бази даних. Потім стічні води подають у резервуар 3 для очищення (рис. 4). Попередньо синтезований мідно-цинковий ферит подають з резервуару 4 за допомогою дозатора 5 до резервуару 3. На початковому етапі контакту фериту і стічних вод систему перемішують за допомогою мішалки 6 до утворення суспензії. На подальшому етапі процес проводять у стаціонарному режимі. Після закінчення очищення воду подають у технологічний цикл 1. Відпрацьований феритний матеріал направляють на утилізацію (спалювання, збереження у сховищі відходів та ін.).

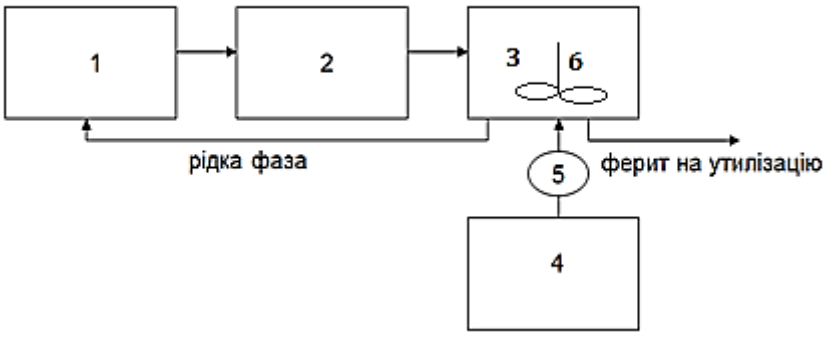


Fig. 4. Scheme of the method of optimization of wastewater purification from organic dyes using ferrite composition
Рис. 4. Схема способу оптимізації очищення стічних вод від органічних барвників за допомогою феритного композиту

Пропонований спосіб оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників за допомогою мідно-цинкового фериту має такі переваги: забезпечення оптимізації і скорочення часу технологічного процесу з урахуванням зміни у часі його механізму, варіюванні параметрів процесу: концентрації розчинів барвників або маси фериту, можливість досягнення певної ефективності. З цією метою побудовано кількісні кінетичні характеристики процесу очищення розчинів від барвників МС, очищення стічних вод з використанням експериментальної бази кінетичних даних, швидке звільнення відстійників, збільшення об'ємів стічних вод, що очищаються.

Висновки та перспективи досліджень

У роботі показана можливість оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників з використанням мідно-цинкового фериту складу $Zn_{0.875}Cu_{0.1}Fe_{4.42}O_4$ за рахунок використання експериментальної бази кінетичних показників стадій очищення

стічних вод від МС, МВ і КЧ. Визначено, що процес очищення стічних вод від ОБ здійснюється за двома механізмами: фотокаталітичних перетворень і сорбції МС, МВ і КЧ на поверхні фериту.

Розраховано кінетичні рівняння залежності концентрації барвників від часу і співвідношення «ФК : ОБ», а саме для стадії фотокаталітичних перетворень: $C_{1МС} = C_{01МС}\cdot e^{-0.28t}$; $C_{1МВ} = C_{01МВ}\cdot e^{-0.43t}$; $C_{1Кч} = C_{01Кч}\cdot e^{-0.13t}$ і сорбції: $C_{2МС} = C_{02МС}\cdot e^{-0.0529t}$; $C_{2МВ} = C_{02МВ}\cdot e^{-0.0476t}$; $C_{02МВ} = C_{01МВ}\cdot 0.8456\cdot e^{-0.00259n}$; $C_{2Кч} = C_{02Кч}\cdot e^{-0.0076t}$; $C_{02Кч} = C_{01Кч} 0.671\ e^{126.4/n}$.

Процес очищення оптимізовано за протіканням одного або двох механізмів процесу з варіюванням часу процесу, вихідної концентрації барвника або маси фериту залежно від необхідності досягнення певних швидкості процесу і глибини очищення.

Запропоновано схему способу оптимізації процесу очищення стічних вод від органічних барвників за допомогою мідно-цинкового фериту.

Перспективними є дослідження процесів очищення стічних вод від органічних барвників з використанням феритів. Запропоновані результати можуть бути спрямовані на підвищення ефективності та повноти проведення процесу очищення. Прогнозується значне збільшення економічного ефекту на разі запровадження процесу очищення, оскільки для виробництва мідно-цинкових феритів пропонується використовувати відходи гальванічного виробництва.

References

[1] Ismail M., Akhtar K., Khan M.I., Kamal T., Murad A. Khan, Abdullah M. (2019). Pollution, toxicity and carcinogenicity of organic dyes and their catalytic bio-remediation. *Current Pharmaceutical Design*, *25*(34), 3645–3663. http://doi.org/10.2174/1381612825666191021142026

[2] Vakili, M., Rafatullah, M., Salamatinia, B., Abdullah, A.Z., Ibrahim, M.H., Tan, K.B. et. al. (2014). Application of chitosan and its derivatives as adsorbents for dye removal from water and wastewater: A review. *Carbohydrate Polymers*, *113*, 115–130. http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.07.007

[3] Md, J., Uddin, R., Ampiaw, E., Wontae, L. (2021). Adsorptive removal of dyes from wastewater using a metal-organic framework: A review. *Chemosphere*, *284*, 131314. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131314

[4] Francisco, J. Alguacil, F., Lopez, A. (2020). Adsorption Processes in the Removal of Organic Dyes from Wastewaters: Very Recent Developments. *Wastewater Treatment*, 17–32. http://doi.org/10.5772/intechopen.94164

[5] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Kolodiazhnyi, V. M., Lisin, D. O. (2022). The efficiency of purification of solutions from organic dyes with the use of copper-zinc ferrites. *Journal of Chemistry and Technologies*, *30*(2), 184–191. http://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.250987

[6] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Bielichenko, O. A., Korovianskyi, V. S. (2022). Polifunktsionalni materialy na osnovi ferytiv dlia ochyshchennia zabarvlenykh stichnykh vod. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu: zb. nauk. pr. 96*, 113–120. http://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2022.96.0.113

[7] Solodovnik, T. V., Tolstopalova, N. M., Fomina, N. M., Yakymenko, I. K. (2019). Doslidzhennia protsesiv ochyshchennia zabarvlenykh rozchyniv pry vykorystanni neorhanichnykh koahuliantiv ta pryrodnoho flokulianta. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, *3*, 108–116. http://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.167654

[8] Li, H., Liu, S., Zhao, J., Feng, N. (2016). Removal of reactive dyes from wastewater assisted with kaolin clay by magnesium hydroxide coagulation process. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *494*, 222–227. http://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.01.048

[9] Madani, M. (2021). Destruction of dyes in wastes of textile products. *Technogenic and ecological safety*, *10*(2/2021), 58–63. http://doi.org/10.52363/2522-1892.2021.2.9

[10] Kanakaraju, D., Glass, B. D., Oelgemöller, M. (2018). Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: a review. *Journal of environmental management*, *219*, 189–207. http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.103

[11] Guo, J., Zhang, Q., Cai, Z., Zhao, K. (2016). Preparation and dye filtration property of electrospun polyhydroxybutyrate–calcium alginate/carbon nanotubes composite nanofibrous filtration membrane. *Separation and Purification Technology*, *161*, 69–79. http://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.036

[12] Zou, H., Ma, W., Wang, Y. (2015). A novel process of dye wastewater treatment by linking advanced chemical oxidation with biological oxidation. *Archives of Environmental Protection*, *41*(4), 33–39. http://doi.org/10.1515/aep-2015-0037

[13] Kutsan, N. V., Vozniak, V. S., Ivanenko, I. M. (2019). Doslidzhennia adsorbtsiinykh vlastyvostei chystykh i kompozytnykh ferytiv. *Scientific Journal «ScienceRise»*, *9–10*(62–63), 32–37. http://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.180982

[14] Velusamy, S., Roy, A., Sundaram, S., Kumar Mallick, T. (2021). A Review on Heavy Metal Ions and Containing Dyes Removal Through Graphene Oxide-Based Adsorption Strategies for Textile Wastewater Treatment. *Chemical Record (New York, N.Y.)*, *21*, 1570–1610. http://doi.org/10.1002/tcr.202000153

[15] Shestopalov, O. V., Hetta, O. S., Rykusova, N. I. Suchasni metody ochyshchennia stichnykh vod kharchovoi promyslovosti. *Naukovo-praktychnyi zhurnal. Ekolohichni nauky*, *2*(25), 20–27. https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-4

[16] Patil, D. J., Behera, S. N. (2023). Synthesis and characterization of nanoparticles of cobalt and nickel ferrites for elimination of hazardous organic dyes from

industrial wastewater. *Environ Sci Pollut Res, 30*, 53323–53338. doi: https://doi.org/10.1007/s11356-023-26059-5

[17] Pai, S., Kini, M.S., Selvaraj, R. (2021). A review on adsorptive removal of dyes from wastewater by hydroxyapatite nanocomposites. *Environmental Science and Pollution Research International*, *28*, 11835–11849. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07319-9

[18] Hunge, Y. M., Mohite, V. S., Kumbhar, S. S., Rajpure, K. V., Moholkar, A. V., Bhosale, C. H. (2015). Photoelctrocatalytic degradation of methyl red using sprayed WO_3 thin films under visible light irradiation. *Journal of Materials Science*, *26*, 8404–8412. https://doi.org/10.1007/s10854-015-3508-z

[19] Zoria, O., Ternovtsev, O., Zoria, D., Walery, M. (2019). Walery Advanced resource-saving copper wastewater treatment by ferritization. *Ways to improve construction efficiency*, *41*, 148–162. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2019.41.148-162

[20] Ahmed, Hassoon Ali (2019). Treatment of wastewater contaminated with dyes using modified low-cost adsorbents. *All rights reserved*, *140*, 326–336. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23513

[21] Pan, P. L., Peng, B. (2022). Efficient Adsorption and Removal of Organic Dyes from Wastewater Using Magnetic UiO-66 Composites. *Key Engineering Materials*, *938*, 171–176. https://doi.org/https://doi.org/10.4028/p-hcq3mq

[22] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Belichenko, O. A., Vankevich, O. V. (2021). Multifunctionality of composite material based on copper-zinc ferrite. *Journal of Chemistry and Technologies, 29*(4), 476–484. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v29i4.240173

[23] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Vankevich, O. V., Tolmachov, S. M. (2022). Technically useful properties of copper-zinc ferrites. *Functional Materials*, *29*(1), 62–71. https://doi.org/10.15407/fm29.01.62

[24] Larin, V., Datsenko, V., Egorova, L., Hraivoronskaia, I., Herasymchuk, T. (2020). Physical and chemical properties of copper-zinc galvanic sludge in the process of thermal treatment. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*, *9*(1), 66–75.

[25] Panteleimonov, A. V., Khrystenko, I. V., Ivanov, V. V. (2012). [*Statistical and chemometric methods in chemistry: textbook*] Kharkiv: KhNU named after V. N. Karazin. (In Ukrainian).