



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

THE EFFICIENCY OF PURIFICATION OF SOLUTIONS FROM ORGANIC DYES WITH THE USE OF COPPER-ZINC FERRITES

Vita V. Datsenko¹, Elina B. Khobotova^{1*}, Volodymyr M. Kolodiazhnyi¹, Denis O. Lisin²¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslav Mudry Str., Kharkiv, 61002, Ukraine²V. N. Karazin Kharkov National University, 4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Received 10 January 2022; accepted 20 May, Available online 25 July 2022

Abstract

Aim. Study of the efficiency (E) of purification of solutions from organic dyes depending on the type of dye, the composition of the Cu-Zn-ferrite composite (FC) and its repeatability, creation of a mathematical model of the cleaning process. **Methods.** The photocatalytic and sorption properties of FCs were studied spectrophotometrically during the purification of solutions from methyl violet MV, methylene blue MB, and Congo red CR. The mathematical model of the cleaning process was created using the MATLAB application package (Toolbox subsystem). **Results.** It is shown that the first order of reaction is observed in the entire time interval of the purification process when the mechanism is changed from the predominant photocatalysis to adsorption within 3–5 h. The specific activity of FC is high when purified from all dyes at a mass ratio of "FC: dye" (n) \geq 500. Anionic character CR reduces E purification in comparison with MV and MB. Re-use of FCs with a reduced E is advisable in case of prolonged contact of FC with colored solutions in sedimentation tanks. Optimization of the total cleaning processes was carried out by deriving third-order regression equations " $E - n - \text{time}$ " with an expanded range of optimal values of the process parameters. **Conclusions.** The purification efficiency and activity of individual FCs vary depending on the type of dye and the ferrite composition. FCs are more efficient in the purification of solutions from MV and MB than from CR. Optimal n varies within 700–1370. The regression equations are derived by the least squares method, which allow to optimize the process in terms of FC activity, efficiency and time of the process.

Keywords: ferritic composite material; organic dyes; photocatalysis; sorption; efficiency; mathematical model.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИСТКИ РОЗЧИНІВ ВІД ОРГАНІЧНИХ БАРВНИКІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МІДНО-ЦИНКОВИХ ФЕРИТІВ

Віта В. Даценко¹, Еліна Б. Хоботова^{1*}, Володимир М. Колодяжний¹, Денис О. Лісін²¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна²Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

Анотація

Мета. Вивчення ефективності (E) очищення розчинів від органічних барвників (БР) залежно від типу БР, складу Cu-Zn-феритного композиту (ФК) та повторності його використання, створення математичної моделі процесу очищення. **Методи.** Фотокаталітичні та сорбційні властивості ФК вивчали спектрофотометрично при очищенні розчинів від метилвіолету МВ, метиленового синього МС та Конго червоного КЧ. Математична модель процесу очищення створена за допомогою пакету прикладних програм MATLAB (підсистема Toolbox). **Результати.** Показано дотримання першого порядку реакції у всьому часовому інтервалі процесу очищення за зміни механізму з переважаючого фотокаталізу на адсорбцію протягом 3–5 год. Питома активність ФК висока при очищенні від усіх БР за масового співвідношення «ФК : БР» (n) \geq 500. Аніонний характер КЧ знижує E очистки у порівнянні з МВ і МС. Повторне використання ФК із зниженою E доцільно за тривалого контакту ФК із забарвленими розчинами у відстійниках. Проведено оптимізацію сумарних процесів очищення шляхом виведення рівнянь регресії третього порядку « $E - n - \text{час}$ » з розширеною областю оптимальних значень параметрів процесу. **Висновки.** Ефективність очищення та активність окремих ФК змінюються залежно від типу БР та складу фериту. ФК ефективніші для очищення розчинів від МВ та МС, ніж від КЧ. Оптимальне n варіює в межах 700–1370. Методом найменших квадратів виведено рівняння регресії, що дозволяють оптимізувати проведення процесу з активності ФК, ефективності та часу процесу.

Ключові слова: феритний композитний матеріал; органічні барвники; фотокаталіз; сорбція; ефективність; математична модель.

*Corresponding author: e-mail address: elinahobotova@gmail.com

© 2022 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v30i2.250987

Вступ

Актуальним завданням хімічної технології є створення маловідходних циклів. Це стосується технологічних процесів із утворенням забарвлених стічних вод. Останнім часом розширюється використання оксидних та феритних матеріалів для адсорбційного очищення [1–5] та фотокаталітичної деградації барвників (БР) аж до фотомінералізації [1, 6–11]. Основним завданням є досягнення високої ефективності фотокаталітичних процесів при використанні наноматеріалів, що було показано на прикладі TiO_2 [12], впливу на ширину забороненої зони основного матеріалу добавок CdO – полупровідника *p*-типу [13], добавок Cu(II) , що розширюють поглинання світла TiO_2 у видиму область [14; 15].

Активність фотокаталізаторів залежить від виду аніонів розчину. Сульфат-іони мають двояку дію: викликають колоїдну нестабільність і зменшують поверхневий контакт між БР і фотокаталізатором [16], з іншого боку – посилюють фотодеградацію БР під УФ-опроміненням [17], збільшують іонну силу розчину, що призводить до підвищеної фотокаталітичної ефективності [18].

Актуальна оптимізація дози фотокаталізатора для ефективного видалення БР. Доза залежить від морфології частинок фотокаталізатора, інтенсивності опромінення, типу БР та його адсорбції. Адсорбційний процес БР на поверхні TiO_2 розширює спектр його поглинання від УФ до видимого режиму [19]. Однак зі збільшенням дози каталізатора адсорбція БР сильно зростає, шари БР екранують поверхню та знижують інтенсивність фотокаталізу. Зі збільшенням маси каталізатора швидкість фотопроцесів спочатку збільшується, а потім зменшується [20].

Мета роботи полягала у вивченні ефективності очищення розчинів від БР залежно від типу БР, складу Cu-Zn -феритного композиту (ФК) та повторюваності його використання, створенні математичної моделі процесу очищення.

Матеріали та методи дослідження

ФК на основі феритів міді та цинку отримані методами співосадження з мідно-цинкових розчинів – відходів гальванічного виробництва. Подібний підхід до переробки відходів був використаний нами раніше при отриманні технічно корисних гальванічних шлаків [21]. Синтез ФК здійснювався за

нагрівання та pH 10–10.5 у двох варіантах: 1) за додавання у певній пропорції $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ і подальшому введенні в розчин окисників O_2 (отримано ФК-К), H_2O_2 (ФК-ПВ), $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (ФК-ПДС) [22–24]; 2) за введення $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, Na_2SO_3 з одночасним насиченням киснем (ФК-ЗС). ФК були відмиті від розчинних домішок. Склад феритів розраховано на підставі мінерального та елементного складу ФК з урахуванням вільних фаз CuO , Cu_2O і Fe_2O_3 : ФК-К – $\text{Zn}_{0,875}\text{Cu}_{0,1}\text{Fe}_{4,42}\text{O}_4$ [23], ФК-ПВ – $\text{Zn}_{0,98}\text{Cu}_{0,37}\text{Fe}_{3,66}\text{O}_4$ [23], ФК-ПДС – $\text{Zn}_{1,66}\text{Cu}_{0,448}\text{Fe}_{3,77}\text{O}_4$ [22], ФК-ЗС – $\text{Zn}_{2,28}\text{Cu}_{1,6}\text{Fe}_{7,23}\text{O}_4$ [24].

Фотокаталітичні та сорбційні властивості ФК вивчали в процесі очищення водних розчинів від БР: метилвіолету МВ, метиленового синього МС (катионні барвники) та Конго червоного КК (аніонний барвник). Концентрації барвників визначали спектрофотометричним методом на спектрофотометрі SPEKOL 11 за довжини хвиль $\lambda = 620$ нм (МВ, МС) і $\lambda = 500$ нм (КК). Очищення водних розчинів від БР проводили в статичному режимі 1–96 годин. Експериментально визначено зміну швидкості процесів перетворень БР у часі «С – час» за різних масових співвідношень $n = \text{«ФК} : \text{БР»}$ (мг : мг), залежність ефективності E процесу очищення розчинів від БР та маси перетвореного барвника на одиницю маси ФК a (питома активність ФК). Кількісні показники процесу розраховані за формулами:

$$E = \frac{(C_0 - C_x)100}{C_0}, \%$$

$$a = \frac{(C_0 - C_x)V}{m}, \text{ мг/г,}$$

де: C_0 – початкова концентрація БР у розчині, 10 мг/л; C_x – концентрація БР у певний момент часу, мг/л; V – об'єм розчину, л; m – маса фериту, г.

Результати та обговорення

Сорбційні та фотокаталітичні властивості ФК. Отримані ФК мають ряд характеристик, що зумовлюють можливість прояву ними фотокаталітичної та сорбційної активності: нанокристалічність, відповідний мінеральний склад з наявністю феритних фаз із загальною формулою $\text{Zn}_x\text{Cu}_y\text{Fe}_z\text{O}_4$, що включає напівпровідники ZnO , Fe_2O_3 і CuO . Енергія забороненої зони феритних фаз може суттєво змінюватися при варіюванні вмісту перехідних металів Cu і Zn [13], що було

показано в [6] для Zn. Також впливають на ширину забороненої зони середній розмір кристалітів, деформація та постійна ґратки, чистота фази та концентрації носіїв заряду. Наявність у розчині іонів SO_4^{2-} призводить до їхньої адсорбції на поверхні ФК. За реакції SO_4^{2-} з дірками валентної зони утворюється SO_4^- – дуже сильний окисник з тривалим періодом напіврозпаду та високою селективністю до окиснення органічних забруднювачів у широкому діапазоні рН [18; 25].

Очевидно, фотокаталітична активність проявляється ФК у перші години контакту з

розчинами БР. Зміна концентрації БР у часі, що наведена в напівлогарифмічних координатах (рис. 1), вказує на те, що за дотримання першого порядку реакції відбувається зміна механізму процесу після закінчення 3–5 годин для всіх значень n . Ділянка I відповідає швидкому зменшенню концентрації БР при фотокаталітичних перетвореннях, ділянка II – перебігу адсорбції. Величина концентрації C_{02} визначає максимальну кількість барвника, яка може адсорбуватися ФК за заданого n .

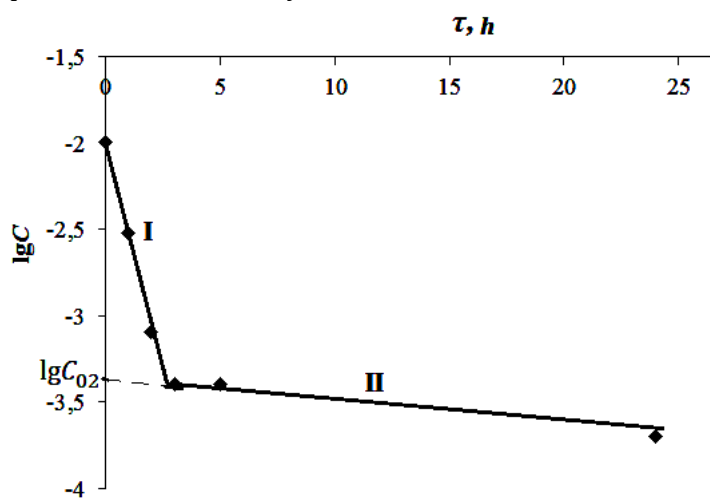
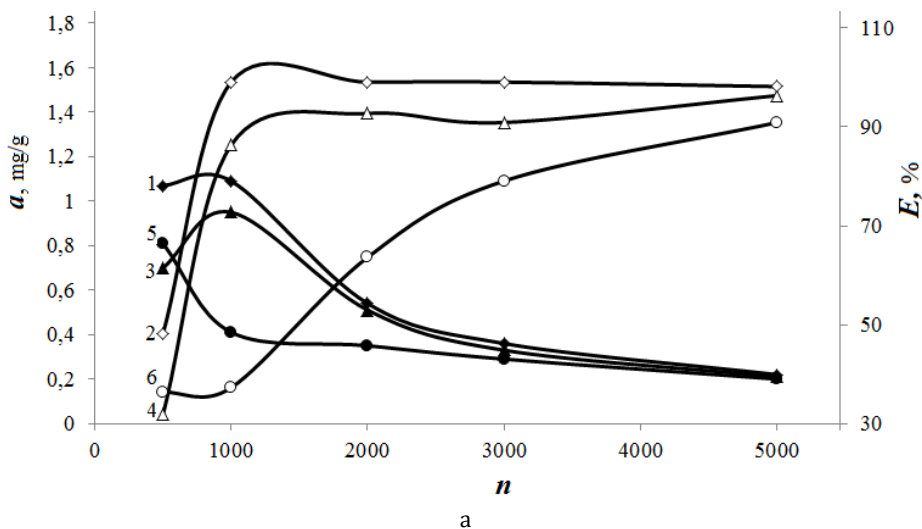


Fig. 1. Dependence of $\lg C_{MV}$ on time when using FC-PH with $n = 1000$
Рис. 1. Залежність $\lg C_{MB}$ від часу при використанні ФК-ПВ с $n = 1000$

Ефективність процесу очищення розчинів БР при контакті з ФК. Кількісну оцінку процесу очищення розчинів від БР проводили за величинами питомої активності ФК a та ефективності очищення розчину E за 96 годин (рис. 2). Результати графічних даних (рис. 2, криві 1, 3, 5, 7) показують, що для всіх ФК характерна висока a у процесах очищення

розчинів від барвників. Питома активність ФК із перетворення БР різна (рис. 2а–в). Величина a більша для ФК-ПВ (крива 1) і ФК-К (крива 3), ніж a для ФК-ПДС (крива 5) і ФК-ЗС (крива 7). Феритні композити характеризуються високими a при очищенні від усіх БР за $n \geq 500$.



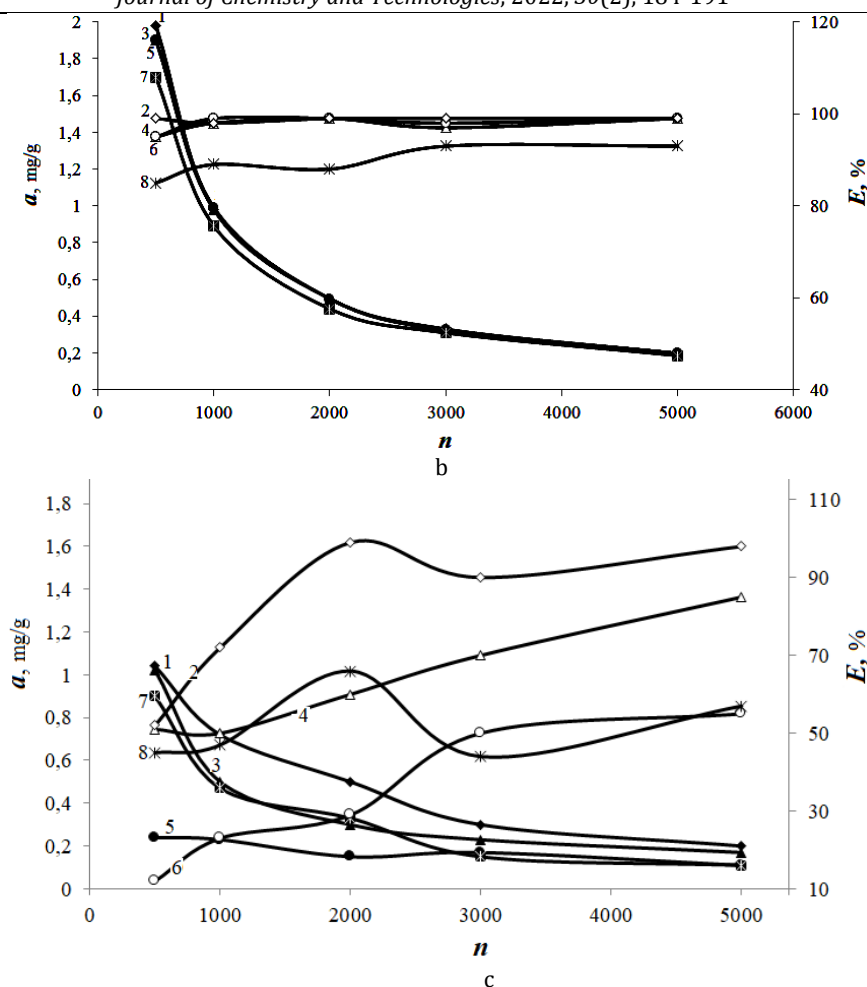


Fig. 2. Dependence of the specific gravity of the converted dye by ferrite composites a (curves 1, 3, 5, 7) and the efficiency of the process of purification of solutions E (curves 2, 4, 6, 8) on the dyes MB (a), MV (b), and CR (c) in the presence of FC-PH (curves 1, 2), FC-O (curves 3, 4), FC-PDS (curves 5, 6) and FC-FS (curves 7, 8) depending on n
Рис. 2. Залежність питомої маси перетвореного барвника феритними композитами a (криві 1, 3, 5, 7) та ефективності процесу очищення розчинів E (криві 2, 4, 6, 8) від барвників МС (а), МВ (б) і КК (с) у присутності ФК-ПВ (криві 1, 2), ФК-К (криві 3, 4), ФК-ПДС (криві 5, 6) і ФК-ЗС (криві 7, 8) залежно від n

Для залежностей « a - n » характерні дві ділянки, що відрізняються різними кутами нахилу. У разі збільшення маси ФК на першій ділянці (інтервал $n = 500$ – 1000) у процесах очищення від МВ, КК і МС за допомогою ФК-ПДС і ФК-К відбувається різке зменшення a . За $n = 1000$ – 2000 , зменшення питомої активності феритного композиту a більш плавне і закінчується стабілізацією процесу.

Величини ефективності очищення розчину E та питомої активності ФК a при очищенні розчинів МС і МВ з різними масовими співвідношеннями «ФК : БР» n для ФК-ПДС і ФК-ЗС перевищують значення E та a у разі очищення розчину від КК (рис. 2а–в, криві 5, 7). При очищенні розчину від МС з використанням ФК-ПДС це перевищення становить 1.8–3.4 рази; від МВ для ФК-ПДС – 1.8–7.9, для ФК-ЗС – 1.8–1.9.

Однією з оптимальних умов процесу можна вважати $n \geq 500$ (рис. 2). В цьому випадку при очищенні від МВ композитами ФК-ПВ і

ФК-К ефективність очищення розчинів дорівнює 99–100 % за найбільшого значення $a = 1.9$ мг/г. При очищенні води від МС $E = 98$ – 99 % за участю ФК-ПВ ($n = 100$ – 5000), 90–96 % – ФК-К ($n = 1000$ – 5000), 90 % – ФК-ПДС ($n = 5000$). Ефективність очищення розчину від КК за використання ФК-ПВ і ФК-К відповідно складає 98–99 % ($n = 2000$ – 5000) і 85 % ($n = 5000$), а в присутності ФК-ПДС і ФК-ЗС відзначені порівняно невисокі показники очищення: 55 % ($n = 5000$) і 66 % ($n = 2000$) відповідно.

Синтезовані ФК найефективніші при очищенні розчинів від барвників МВ і МС (рис. 2а, б), меншу ефективність ФК виявляють при очищенні від КК (рис. 2в). В останньому випадку зниження ефективності очищення розчинів можна пояснити тим, що КК є аніонним барвником, а МВ і МС – катіонними. Електростатичне відштовхування аніону КК від негативно зарядженої поверхні феритів з великою кількістю ОН-груп гальмує

перетворення КК у можливих фотокаталітичних процесах та адсорбції.

Оптимальні масові співвідношення «ФК:БР». Маса ФК істотно впливає на ефективність очищення розчину від БР. За нестачі ФК не може бути досягнута висока ефективність очищення через недостатнє видалення БР з розчину в будь-яких фізико-хімічних процесах. Надлишок ФК не приносить істотної вигоди у плані

підвищення E за одночасної перевитрати феритного матеріалу. У зв'язку з цим важливим є визначення оптимальної величини n , за якої досягається високий ступінь очищення розчинів БР і велика маса перетвореного БР на одиницю маси ФК. На рис. 2 цьому відповідають точки перетину кривих « $E-n$ » і « $a-n$ ». У табл. 1 представлені оптимальні інтервали n під час проведення процесів очищення розчинів від БР.

Table 1

Optimal intervals of mass ratios n

Таблиця 1

Ферит	Оптимальні інтервали масових співвідношень n					
	n	МС $n = \pm 10\%$	МВ $n = \pm 10\%$	КК $n = \pm 10\%$	n	$n = \pm 10\%$
ФК-К	770	693-840	710	639-781	700	630-770
ФК-ПВ	800	720-880	720	648-792	740	666-814
ФК-ПДС	1370	1233-1507	700	630-770	1000	900-1100
ФК-ЗС	-	-	780	702-858	780	702-858

Зазначені у табл. 1 значення n можна рекомендувати для практичного використання композиційних матеріалів на основі мідно-цинкового фериту як реагентів для очищення розчинів від органічних барвників.

Повторне використання ФК у процесах очищення фарбованих вод. Перевірено можливість використання ФК у вторинному циклі без підготовчих операцій щодо їх попередньої обробки або регенерації, що виключає додаткову витрату реагентів. Проведено порівняння ефективності очищення E водного розчину МВ в часі (рис. 3) до (криві 1-4) та після повторного

використання (криві 1'-4') зразків ФК. За повторного використання ФК ефективність E (криві 1'-4') зменшується у порівнянні з аналогічними показниками до їх повторного застосування (криві 1-4). Хід кривих « $E-t$ » (рис. 3) для відповідних ФК в процесі первісного використання (криві 1-4) мають S-образний характер із виходом на плато. Максимуми значень a і E : $a = 0.98$ мг/г, $E = 98$ % (крива 1) для ФК-ПВ і (крива 2) ФК-К відзначені через 2 години; $a = 0.99$ мг/г, $E = 99$ % (крива 3) для ФК-ПДС – через 48 годин; $a = 0.89$ мг/г, $E = 89$ % (крива 4) для ФК-ЗС – через 5 годин витримки.

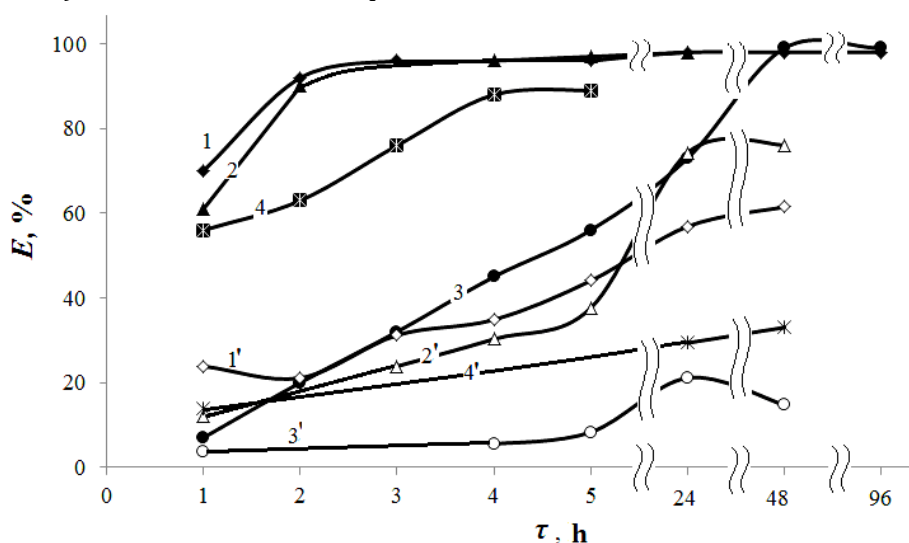


Fig. 3. Dependence of the efficiency of purification of the MV solution on time at $n = 1000$ for the initial (curves 1-4) and reuse (curves 1'-4') FC: 1, 1' - FC-PH; 2, 2' - FC-O; 3, 3' - FC-PDS; 4, 4' - FC-FS

Рис. 3. Залежність ефективності очищення розчину МВ від часу за $n = 1000$ для початкового (криві 1-4) та повторного використання (криві 1'-4') ФК: 1, 1' - ФК-ПВ; 2, 2' - ФК-К; 3, 3' - ФК-ПДС; 4, 4' - ФК-ЗС

За повторного використання ФК у водному розчині МВ перебіг кривих « $E-t$ » плавний на всьому часовому інтервалі (криві 1'–4'). У часі для всіх ФК спостерігається поступове збільшення E . Максимальних значень ці показники досягають через 24 години витримки у розчині БР для ФК-К (крива 2') $E = 76\%$ і ФК-ПДС (крива 3') $E = 21\%$; через 48 годин для ФК-ПВ (крива 1') $E = 61\%$ і ФК-ЗС (крива 4') $E = 33\%$. У порівнянні з первісним використанням повторне застосування ФК знижує ефективність очищення водного розчину МВ у 2–4 рази і збільшує час досягнення максимуму E процесу в 10–24 рази (за винятком ФК-ПДС).

Практичні рекомендації щодо використання феритних композитів у процесах очищення пофарбованих (забарвлених?) вод. Зменшення ефективності очищення забарвлених розчинів за допомогою ФК пов'язане з адсорбцією барвників, що екранує (екранує що?). Спочатку на поверхні ФК утворюється адсорбційний мономолекулярний шар БР, потім полімолекулярний. Процес адсорбції уповільнюється, починається десорбція БР із поверхні ФК. Тому за повторного використання ФК ефективність їхньої дії зменшується.

Отримані результати свідчать про зниження ефективності очистки забарвлених вод за допомогою феритних композитів. Однак це не є перешкодою для проведення

процесу у разі, коли фактор часу не є критичним, і існує можливість більш тривалої витримки стічних вод у контакт з ФК у відстійниках або інших резервуарах.

Математичне моделювання процесів очищення фарбованих вод ФК засновано на великому блоці експериментальних даних щодо залежності ефективності очищення розчинів від барвників E від часу протікання процесу t і співвідношення n «ФК : БР» та дозволяє екстраполювати значення E при інших значеннях змінних (час і масові співвідношення компонентів). Для математичного опису сумарного ефекту від усіх процесів, що протікають під час очищення вод від барвників МВ, МС і КК за допомогою ФК використовувався пакет прикладних програм MATLAB та його підсистема Toolbox (пакет математичний) – набір спеціалізованих математичних функцій, з допомогою якого проведено оптимізацію систем. Методом найменших квадратів побудовано рівняння регресії третього порядку залежностей « $E-n-t$ » (табл. 2) із розширеною областю оптимальних значень n і t . Коефіцієнти рівнянь отримані з 95 %-ою ймовірністю. Рівняння регресії дозволяють розрахувати ефективність очищення від усіх БР при використанні всіх синтезованих ФК у будь-який момент часу за фіксованого масового співвідношення «ФК : БР». Рис. 4 є графічним зображенням однієї із залежностей.

Table 2

Regression equations “ $E-n-t$ ”

Таблиця 2

Рівняння регресії « $E-n-t$ »			
КР	ФК	Рівняння регресії	№
МВ	ФК-К	$E = 7.815 + 1.736t + 0.06714n - 0.01424t^2 - 0.0002691tn - 2.591 \cdot 10^{-5}n^2 + 1.863 \cdot 10^{-6}t^2n + 5.263 \cdot 10^{-9}tn^2 + 2.906 \cdot 10^{-9}n^3$	1
	ФК-ПВ	$E = 10.4 + 1.787t + 0.06014n - 0.01566t^2 - 0.000473tn - 2.169 \cdot 10^{-5}n^2 + 3.75 \cdot 10^{-6}t^2n + 1.599 \cdot 10^{-8}tn^2 + 2.322 \cdot 10^{-9}n^3$	2
	ФК-ПДС	$E = 20.8 + 5.612t + 0.0613n - 0.3177t^2 + 0.002477tn - 2.69 \cdot 10^{-5}n^2 - 1.526 \cdot 10^{-5}t^2n - 2.625 \cdot 10^{-7}tn^2 + 3.13 \cdot 10^{-9}n^3$	3
	ФК-ЗС	$E = 14.56 + 3.928t + 0.04291n - 0.2224t^2 + 0.001734tn - 1.883 \cdot 10^{-5}n^2 - 1.068 \cdot 10^{-5}t^2n - 1.838 \cdot 10^{-7}tn^2 + 2.191 \cdot 10^{-9}n^3$	4
МС	ФК-К	$E = 22.67 + 2t - 0.02173n - 0.02081t^2 + 0.0002241tn + 1.007 \cdot 10^{-5}n^2 + 1.545 \cdot 10^{-6}t^2n - 5.869 \cdot 10^{-8}tn^2 - 1.112 \cdot 10^{-9}n^3$	5
	ФК-ПВ	$E = 16.94 + 0.49t + 0.0187n - 0.0043t^2 + 0.000478tn - 4.893n^2 - 2.922 \cdot 10^{-6}t^2n - 3.096 \cdot 10^{-8}tn^2 + 3.91 \cdot 10^{-10}n^3$	6
	ФК-ПДС	$E = 56.74 - 0.6798t - 0.05555n + 0.00455t^2 + 0.0008003tn + 2.039 \cdot 10^{-5}n^2 - 2.968 \cdot 10^{-6}t^2n - 7.182 \cdot 10^{-8}tn^2 - 2 \cdot 10^{-9}n^3$	7
КК	ФК-К	$E = 4.352 + 0.5597t + 0.01044n - 0.002677t^2 + 0.0003149tn - 4.928 \cdot 10^{-6}n^2 - 2.892 \cdot 10^{-6}t^2n + 3.241 \cdot 10^{-9}tn^2 + 6.54 \cdot 10^{-10}n^3$	8
	ФК-ПВ	$E = 1.147 + 0.3985t + 0.01329n - 0.002499t^2 + 0.0006791tn - 4.371 \cdot 10^{-6}t^2n - 4.265 \cdot 10^{-8}tn^2 + 6.911 \cdot 10^{-10}n^3$	9
	ФК-ПДС	$E = 7.297 + 1.08t - 0.001011n - 0.01227t^2 - 3.127 \cdot 10^{-5}tn - 1.655 \cdot 10^{-6}n^2 + 3.215 \cdot 10^{-6}t^2n - 2.814 \cdot 10^{-8}tn^2 + 3.153 \cdot 10^{-10}n^3$	10
	ФК-ЗС	$E = 26.14 + 0.9425t + 0.00983n - 0.01108t^2 + 0.0001192tn - 7.532 \cdot 10^{-6}n^2 + 1.477 \cdot 10^{-7}t^2n - 2.14 \cdot 10^{-9}tn^2 + 9.911 \cdot 10^{-10}n^3$	11

Висновки

Очищення водних розчинів від органічних барвників МВ, МС та КК пов'язане з одночасним перебігом фотокаталітичних процесів та адсорбції барвників на поверхні Cu-Zn-ФК.

Ефективність очищення розчинів від БР та питома активність окремих ФК варіюють залежно від типу барвника та складу фериту. ФК ефективніші при очищенні розчинів від МВ та МС, ніж від КК. Оптимальне масове співвідношення «ФК : БР» варіює в межах 700–1370.

Феритні композити втрачають свою ефективність при повторному використанні, процес очищення сповільнюється, проте їх застосування доцільно в тих випадках, коли фактор часу не критичний, і існує можливість тривалішої витримки забарвлених стічних вод в контакт з феритами у відстійниках.

За допомогою математичного моделювання виведено рівняння регресії залежності ефективності процесу очищення від часу та масового співвідношення «ФК : БР», що дозволяють визначити оптимальні умови процесу.

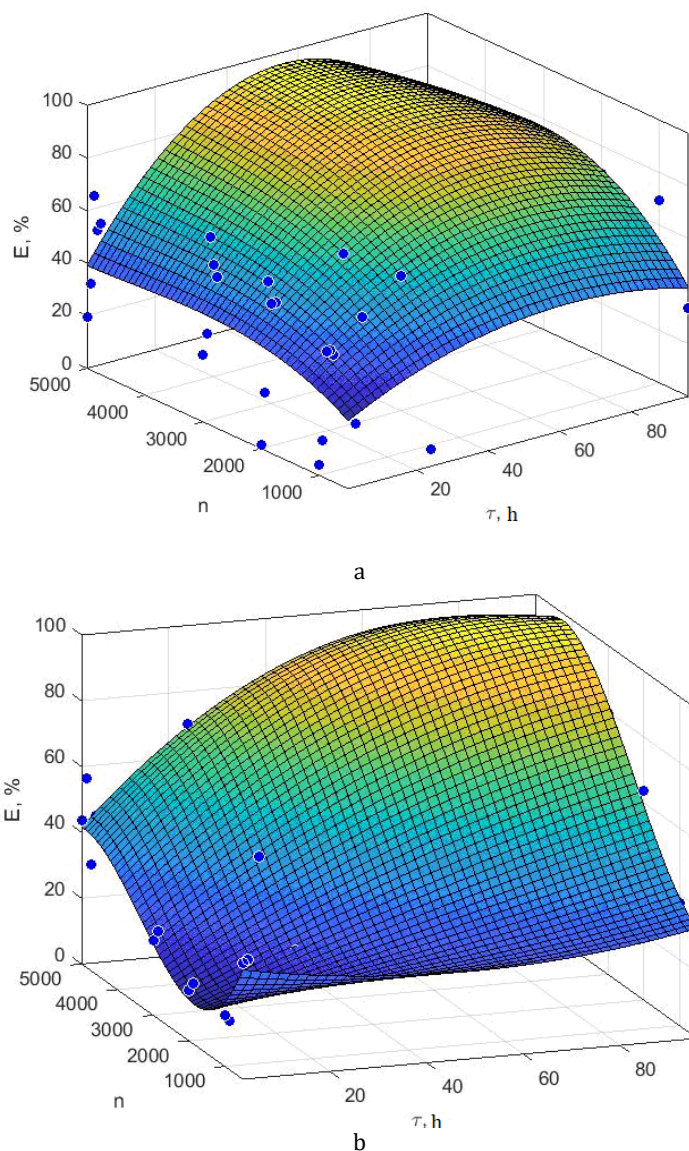


Fig. 4. Graphic representation of the dependencies "E-n-τ" (Table 2): a - 6; b - 7

Рис. 4. Графічне зображення залежностей «E-n-τ» (табл. 2): a - 6; б - 7

References

- [1] Lukyanenko, T. V., Nikolenko, M. V., Dmitrikova, L. V., Maslak, G. S., Velichenko, O. B. (2020). [Surface properties of lead (IV) oxide] *J. of Chem. and Techn.*, 28(2), 211–220. (in Ukrainian). <https://dx.doi.org/10.15421/082023>
- [2] Khotobova, E. B., Hraivoronska, I. V. (2019). [Secondary use of metallurgical slags as sorbents in wastewater treatment] *Chernye metaly*, 7, 55–61 (in Russian).
- [3] Khotobova, E., Hraivoronska, I., Kaliuzhna, Iu., Ihnatenko, M. (2021). Sorption purification of wastewater from organic dyes using granulated blast-

- furnace slag. *ChemChemTech.*, 64(6), 89–94. <https://dx.doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6302>
- [4] Khobotova, E. B., Hraivoronska, I. V., Ihnatenko, M. I., Kaliuzhna, Iu. S. (2020). Adsorption of organic dyes on metallurgical slag of Fe-Ni alloy production. *ChemChemTech.*, 63(8), 103–108. <https://dx.doi.org/10.6060/ivkkt.20206308.6197>
- [5] Tarnovsky, D. V., Tsyba, M. M., Kuznetsova, L. S., Khodakovska, T. A., Romanova, I. V. (2021). Physico-chemical properties of cerium- and ferric-doped titanium hydroxides synthesized by two methods. *J. of Chem. and Techn.*, 29(1), 192–199. <https://dx.doi.org/10.15421/jchemtech.v29i2.232199>
- [6] Frolova, L. A. (2021). [Optimization of photocatalytic destruction of methylene blue]. *J. of Chem. and Techn.*, 29(3), 425–432. (in Ukrainian). <https://dx.doi.org/10.15421/jchemtech.v29i3.233699>
- [7] Frolova, L. A., Hrydnieva, T. V. (2020). Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of MFe₂O₄ (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *J. of Chem. and Techn.* 28(2), 202–210. <https://dx.doi.org/10.15421/082022>
- [8] Garcia-Muñoz, P., Fresno, F., Peña O'shea, V., Keller, N. (2020). Ferrite Materials for Photoassisted Environmental and Solar Fuels Applications. *Topics in current chemistry, Springer*, 378(1), 90 p.
- [9] Romanovsky, V. I., Kulichik, D. M., Pilipenko, M. V. (2019). [Iron-zinc-containing photocatalysts from the sludge of cleaning wash water of deferrization filters]. *Vodoochistka*, 4, 71–77 (in Russian).
- [10] Gupta, N. K., Ghafari, Ya., Kim, S., Bae, J., Kim, K. S., Saifuddin, Md. (2020). Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants over MFe₂O₄ (M=Co, Ni, Cu, Zn) Nanoparticles at Neutral pH. *Scientific Reports*, 10(4942). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61930-2>
- [11] Ulyankina, A., Leontyev, I., Avramenko, M., Zhigunov, D., Smirnova, N. (2018). Large-scale synthesis of ZnO nanostructures by pulse electrochemical method and their photocatalytic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 76, 7–13.
- [12] Di Paola, A., Garcia-Lopez, E., Marci, G., Palmisano, L. (2012). A survey of photocatalytic materials for environmental remediation. *J. Hazard. Mater.*, 211–212, 3–29. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.050>
- [13] Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R. N., Idriss, H., Nadeem, M. A. (2014). Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. *RSC Adv.*, 4, 37003–37026. <https://dx.doi.org/10.1039/b000000x>
- [14] Chun, H., Yuchao, T., Hongxiao, T. (2004). Characterization and photocatalytic activity of transition-metal-supported surface bond-conjugated TiO₂/SiO₂. *Catal. Today*, 90, 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.04.042>
- [15] Di Paola, M., Zaccagnino, P., Montedoro, G., Cocco, T., Lorusso, M. (2004). Ceramide induces release of proapoptotic proteins from mitochondria by either a Ca²⁺-dependent or a Ca²⁺-independent mechanism. *J. Bioenerg. Biomembr.*, 36, 165–170. <https://doi.org/10.1023/b:jobb.0000023619.97392.0c>
- [16] Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Res.*, 44, 2997–3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>
- [17] Wang, X., Jia, J., Wang, Y. (2011). Degradation of C. I. Reactive Red 2 through photocatalysis coupled with water jet cavitation. *J. Hazard. Mater.*, 185(1), 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.036>
- [18] Chen, X., Wang, W., Xiao, H., Hong, C., Zhu, F., Yao, Y., Xue, Z. (2012). Accelerated TiO₂ photocatalytic degradation of Acid Orange 7 under visible light mediated by peroxymonosulfate. *Chem. Eng. J.*, 193–194, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.033>
- [19] Kaur, S., Singh, V. (2007). TiO₂ Mediated Photocatalytic Degradation Studies of Reactive Red 198 by UV Irradiation. *J. Hazard. Mater.*, 141, 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.123>
- [20] Saquib, M., Abu, T. M., Haque, M., Muneer, M. (2008). Photocatalytic degradation of disperse blue 1 using UV/TiO₂/H₂O₂ process. *J. Environ. Manag.*, 88(2), 300. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.012>
- [21] Larin, V., Datsenko, V., Egorova, L., Hraivoronska, I., Herasymchuk, T. (2020). Physical and chemical properties of copper-zinc galvanic sludge in the process of thermal treatment. *French-Ukrainian J. of Chem.* 08(1), 66–75.
- [22] Khobotova, E. B., Datsenko, V. V., Vankevich, O. V. (2021). Ukraine Patent No. 149385U. Kharkiv, Ukraine. Ukrainian Institute of Industrial Property. (in Ukrainian).
- [23] Khobotova, E. B., Datsenko, V. V., Vankevich, O. V. (2021). Patent application for an invention. The method of removing nanosized copper-zinc ferites with the power of a superparamagnet, a catalyst and an oxidizer. A202104697 (in Ukrainian).
- [24] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Larin, V. I. (2021). Patent application for an invention. A method of obtaining superparamagnetic multimetal ferrites with sorption properties. A 202104699 (in Ukrainian).
- [25] Dhanalakshmi, K. B., Anandan, S., Madhavan, J., Maruthamuthu, P. (2008). Photocatalytic degradation of phenol over TiO₂ powder: The influence of peroxomonosulphate and peroxodisulphate on the reaction rate. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 92, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.10.009>