

УДК: 54-44; 544.478-03

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

О.Ю. Макідо¹, Г.І. Хованець¹, О.Г. Курилець²

Вплив рН середовища на каталітичну активність каталізатора на основі CuO у системі Фентона

¹Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка
НАН України, Львів, Україна, khovanets_galya@ukr.net

²Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Досліджено вплив рН середовища на активність гетерогенного наноструктурованого магніточутливого каталізатора $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ у системі Фентона та запропоновано механізм реакції. Визначено, що каталітичними центрами є Cu^+ та Cu^{2+} . Встановлено, що швидкість деструкції барвника метиленового синього (МС) як модельного забруднювача стічних вод за перші 20 хв процесу залежить від рН, а її значення зменшується в ряді рН (9)>(6)>(3). Після 2 год для всіх початкових значень рН ступінь деструкції МС досягає 85-90%, а рН змінюється до нейтрального. Запропонована система може використовуватися у технології доочищення стічних вод промислового та побутового характеру.

Ключові слова: каталізатор $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$, система Фентона, рН середовища, окиснення метиленового синього, механізм реакції.

Подано до редакції 06.06.2024; прийнято до друку 08.04.2025.

Вступ

Вода є важливим компонентом екосистеми, і її безпека стала ключовим питанням, що стоїть перед суспільством. Ефективне очищення води та повторне використання побутових і технічних стоків є однією з найбільш пріоритетних глобальних проблем сьогодення. Натепер це питання набуло в Україні ще більшої актуальності у зв'язку з воєнними діями, руйнуванням інфраструктури, небезпечними забрудненнями вод. Такі води сильно забруднені не тільки неорганічними сполуками, але і характеризуються високим вмістом похідних нафтопродуктів, зокрема, фенол, бензен тощо, які є токсичними та резистентними до стандартних методів очищення води [1]. Традиційні методи очищення стічних вод, такі як метод фізичної адсорбції [2], електрохімічний метод [3], метод біодеградації [4] не здатні повною мірою вирішити цю проблему.

Останніми роками для очищення стічних вод із стійкими органічними забрудненнями активно застосовують вдосконалені процеси окиснення

(Advanced Oxidation Processes – AOP) [5]. В цих процесах для деградації різних розчинених у воді органічних сполук використовуються утворені *in situ* активні окисні радикали. Серед них найбільш поширеним є процес Фентона, в якому окиснення органічних сполук відбувається пероксидними радикалами, що утворюються в результаті каталітичного розкладу H_2O_2 . Проведені дослідження показали, що процес окиснення Фентона є не тільки ефективним методом у видаленні багатьох небезпечних органічних забруднювачів із стічних вод, а і найбільш перспективним з точки зору економічної ефективності та простоти експлуатації [6, 7].

Основою процесу Фентона є окисно-відновний цикл металів змінної валентності, таких як $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$, $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ тощо, що використовується як каталізатор для одержання реакційноздатних радикалів з H_2O_2 [7, 8]. Висока реакційна здатність Cu по відношенню до H_2O_2 , швидка кінетика утворення активних форм кисню порівняно з Fe, а також низька вартість та екологічність привели до розробки великої кількості каталітичних фентонівських систем на її

основі [9-11].

Для традиційного гомогенного процесу Фентона до недоліків, крім вторинного забруднення гідроксидами металів, треба віднести обмеження робочого діапазону значення рН середовища. Оскільки реакцію потрібно проводити в кислих умовах $\text{pH} \leq 3$ [12], то це вимагає підкислення розчину перед очищенням та нейтралізацію його після. Крім того, гомогенні каталізatori мають низьку можливість повторного використання [13].

При використанні гетерогенної системи Фентона на основі сполук Купруму активація пероксиду водню відбувається у більш ширшому діапазоні рН в порівнянні із феруммісними каталізаторами, а сам процес окиснення органічних сполук може бути проведений в умовах, близьких до нейтральних [14]. Однак, контроль рН важливий не тільки для забезпечення повного окиснення забруднюючих речовин, але й для мінімізації вилугування активних металів [15].

Дана стаття присвячена дослідженню впливу рН середовища на активність гетерогенного каталізатора на основі оксиду Купруму (II).

I. Експериментальна частина

1.1. Синтез каталізатора.

Для дослідження був синтезований багатошаровий каталізатор на основі CuO . Синтез гетерогенного наноструктурованого магніточутливого каталізатора $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ проводили в три стадії. На першій стадії на попередньо сформовані частинки SiO_2 осаджували гідроксиди Феруму та Кобальту з розчинів їх солей (співвідношення 1:2). На другій стадії на отриманих частинках золь-гель методом був сформований пористий шар SiO_2 , на який на третій стадії синтезу проводили осадження гідроксиду Купруму. Відпал отриманого композиту проводили після третьої стадії синтезу за температури 550°C . Такі умови дали змогу отримати наноструктурований багатошаровий каталізатор з магніточутливим ядром CoFe_2O_4 , пористим захисним шаром SiO_2 , на якому розташовані каталітично активні центри CuO [16].

1.2. Методи дослідження.

Як модельний органічний забруднювач стічної води був використаний барвник катіонного типу метиленовий синій (МС, $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$). Процес окиснення барвника метиленового синього у системі Фентона проводили за сталих умов (5 мл модельного розчину МС ($5 \cdot 10^{-5}$ моль/л), 10 мг каталізатора та $4,5 \cdot 10^{-3}$ моль H_2O_2 (35%)) за кімнатних температур без примусового перемішування при початкових значеннях рН розчину 3, 6 та 9. Значення рН регулювали розчинами соляної кислоти та натрію гідроксиду без буферизації. Зміну концентрації барвника у реакційній системі визначали за величиною оптичної густини розчину у скляній кюветі з товщиною шару 1 см при довжині хвилі 620 нм [17] з використанням спектрофотометра Spekol 11. Відбір проб проводили після магнітної сепарації

каталізатора через визначені проміжки часу [18].

Дослідження морфології поверхні отриманих частинок проведено за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММА 102-02 із системою рентгенівського мікроаналізатора (ESD).

Склад синтезованих наноструктурованих частинок досліджували методом інфрачервоної Фур'є-спектроскопії (FTIR). Для попередньої підготовки зразків використовували спосіб пресування зразка в таблетку з KBr (таблетки: 5% зразка в KBr). FTIR-спектри композиту $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ були записані за допомогою спектрометра NICOLET 6700 (Thermo Fisher Scientific). Вимірювання проводили в діапазоні хвилювих чисел $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ з роздільною здатністю 4 см^{-1} [19].

II. Результати та обговорення

2.1. Характеристика каталізатора.

На Рис. 1 представлена SEM-фотографія поверхні синтезованого каталізатора $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$, на якій чітко видно каталітичні центри CuO .

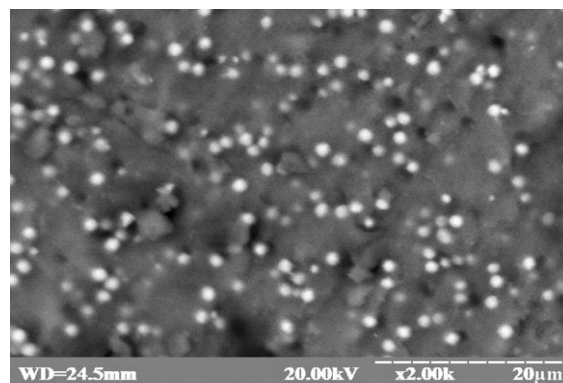
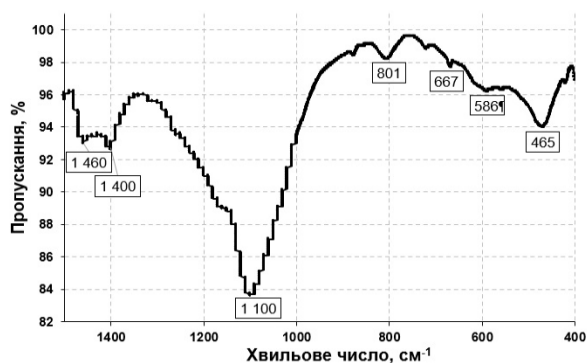


Рис. 1. FESEM-зображення частинок $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$, отримане за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММА 102-02.

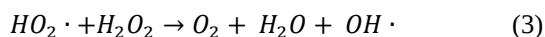
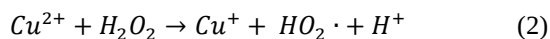
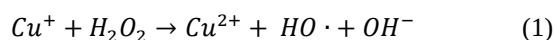
Аналіз отриманих піків на ІЧ-спектрі композиту $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ (Рис. 2) підтвердив наявність у будові ядра каталізатора фериту кобальту структури шпінелі – наявність характерного плато при $590\text{--}560\text{ см}^{-1}$ [20] та валентне коливання, що спостерігається біля 465 см^{-1} [21, 22]. Характеристичне асиметричне коливання Si-O-Si , що спостерігається при 1100 см^{-1} , свідчить про сформовану силікатну оболонку [22], а ширина плеча, ймовірно, пов'язана із вкладом вібрації Si-O-Fe (Co) . Це вказує на взаємодію $\text{Fe}^{3+}(\text{Co}^{2+})$ із сіткою кремнезему [20]. Піки інфрачервоного поглинання при 590 та 470 см^{-1} були віднесені до валентного коливання Cu-O в CuO , а піки поглинання при 1040 та 670 см^{-1} вказують на присутність зв'язку Si-O-Cu [23]. Полосу при 800 см^{-1} можна віднести до валентного коливання Cu-O в Cu_2O , що вказує на існування у структурі каталізатора Купрум (I) оксиду [24]. Таким чином, отримані результати складу синтезованого каталізатора $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ показали, що каталітичними центрами є Cu^+ та Cu^{2+} .

Рис. 2. ІЧ-спектр зразка $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$.

2.2. Вплив рН середовища на активність процесу окиснення МС.

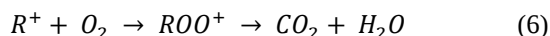
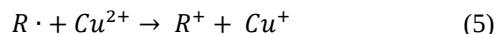
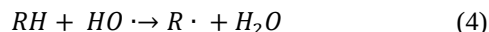
Як показали результати досліджень (Рис. 3а і 3б, табл. 1), синтезований каталізатор проявляє високу активність у всьому досліджуваному діапазоні рН. Ступінь деструкції МС після 2 годин процесу досягає 85-90% за всіх значень рН. Однак вплив рН середовища на швидкість окиснення помітний на початкових стадіях процесу. Найбільша ефективність деструкції МС за 20 хвилин процесу спостерігалась при $\text{pH} = 9$, а ефективність процесу зменшувалась в ряді $\text{pH} (9) > \text{pH} (6) > \text{pH} (3)$ (Рис. 3а, Таблиця 1).

На основі експериментальних результатів запропонований такий можливий механізм гетерогенної фентонівської реакції на каталізаторі $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$:



При використанні окисно-відновного циклу $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ саме реакція Cu^+ з пероксидом водню відповідає за утворення гідроксильних радикалів та Cu^{2+} (1). При цьому відновлення Cu^{2+} до Cu^+ за реакцією (2) протікає повільніше [25].

Утворений гідроксильний радикал реагує із органічними домішками, руйнування яких може відбуватися неповно – до утворення більш коротких та простіших органічних сполук, або до повної мінералізації з утворенням вуглекислого газу, води та мінеральних солей:



За наявності на поверхні оксиду Купруму (І) (Рис. 2) реакція утворення гідроксильних радикалів (1) відбувається з перших секунд процесу деструкції за всіх значень рН. За принципом Ле-Шательє в кислому середовищі на початкових стадіях процесу швидко протікає реакція (1), і одночасно сповільнюється реакція (2). Таким чином, кількість Cu^+ зменшується, що впливатиме на концентрацію утворених гідроксильних радикалів $\cdot\text{OH}$, і, відповідно, на швидкість реакції окиснення органічних сполук (4). Тобто, при $\text{pH} = 3$ каталітична активність композиту $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ на початковій стадії процесу є слабшою (Рис. 3а). При протіканні процесу у лужному середовищі реакція (2) активізується, кількість Cu^+ збільшується, в результаті чого і спостерігається зростання швидкості окиснення МС.

Таблиця 1.

Ступінь та швидкість деструкції МС у процесі Фентона за різних початкових значень рН

№ з/п	Час, хв	рН = 3		рН = 6		рН = 9	
		Ступінь деструкції Р, %	Швидкість процесу $W \cdot 10^8$, моль/л·с	Ступінь деструкції Р, %	Швидкість процесу $W \cdot 10^8$, моль/л·с	Ступінь деструкції Р, %	Швидкість процесу $W \cdot 10^8$, моль/л·с
1	10	43	3,5	56	4,8	71	5,8
2	20	53	2,1	66	2,7	76	3,1
3	60	76	1,0	83	1,1	83	1,1
4	120	86	0,6	90	0,6	88	0,6

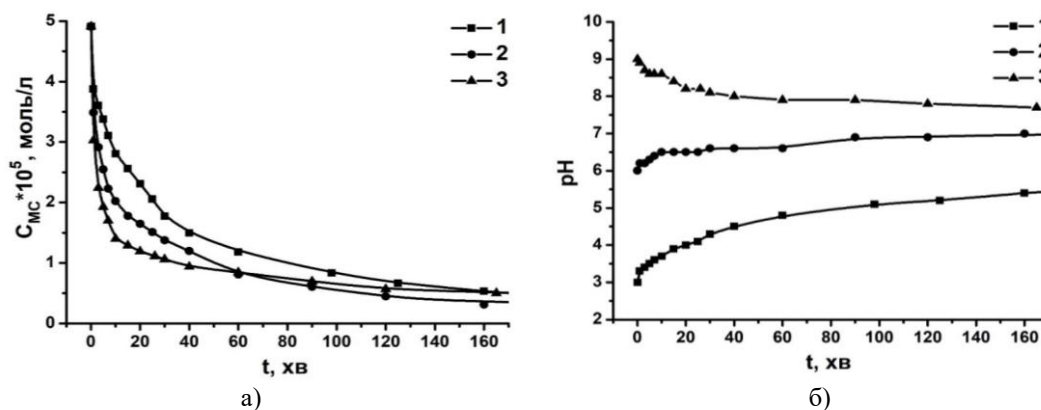


Рис. 3. Кінетичні криві окиснення метиленового синього (а) та зміна значення рН в процесі його деструкції (б) каталізатором $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ за концентрації барвника $C_{\text{МС}} = 5 \cdot 10^{-5}$ моль/л за різних початкових значень рН: 1 – 3; 2 – 6; 3 – 9.

Одночасне протікання реакцій (1) та (2), швидкості яких залежать від умов середовища, приводять до його часткової нейтралізації (Рис. 36). На початковій стадії утворення іонів OH^- або H^+ за реакціями (1) та (2) суттєво впливає на рН середовища, значення якого змінюється на порядок в напрямку до нейтрального. При «вирівнюванні» значень рН швидкість деструкції МС для всіх трьох процесів наближається. Після 120 хвилин процесу ступінь окиснення для усіх досліджуваних систем є практично однаковим і сягає 85-90%.

Висновки

Синтезований нами гетерогенний наноструктурований магніточутливий каталізатор $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ може успішно використовуватись у широкому діапазоні значень рН без втрати своєї активності. Вплив рН середовища спостерігається лише на початковій стадії процесу і не впливає на кінцевий результат окиснення органічних речовин. Перевагою даного каталізатора є легкість його вилучення з реакційного середовища за допомогою магніту, а також нейтралізація рН в результаті протікання процесу окиснення. Така система Фентона на основі запропонованого багат шарового каталізатора $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{CuO}$ може значно спростити технологію доочищення стічних вод промислового та побутового характеру, які характеризуються змінним значенням рН.

Подяка: автори висловлюють подяку за дослідження складу синтезованих наноструктурованих частинок методом інфрачервоної Фур'є-спектроскопії (FTIR) за допомогою спектрометра NICOLET 6700 (Thermo Fisher Scientific) Katarzyna Maresz (Institute of Chemical Engineering Polish Academy of Sciences, Bałtycka 5, 44-100 Gliwice, Poland).

Фінансування: це дослідження було профінансовано Національною академією наук України в рамках виконання наукової роботи НДР III-2-23 № 0123U102170 «Розроблення нових функціональних наноструктурованих мембран і каталізаторів для окиснення C-H-, H(HO)C-вмісних сполук природного та синтетичного походження».

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Макидо О. Ю. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу хімії окислювальних процесів Відділення ФХГК ІнФОВ НАН України;
Хованець Г. І. – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу хімії окислювальних процесів Відділення ФХГК ІнФОВ НАН України;
Курилець О. Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії і технології неорганічних речовин НУ «Львівська політехніка».

- [1] X. Zhang, Y. Ding, H. Tang, et al., *Degradation of bisphenol A by hydrogen peroxide activated with CuFeO_2 microparticles as a heterogeneous Fenton-like catalyst: Efficiency, stability and mechanism*, Chemical Engineering Journal, 236, 251 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.051>.
- [2] Q. Zhou, W. Gong, C. Xie, et al., *Removal of Neutral Red from aqueous solution by adsorption on spent cottonseed hull substrate*, Journal of Hazardous Materials, 185(1), 502 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.029>.
- [3] Y.-H. Huang, Y.-F. Huang, P.-S. Chang, C.-Y. Chen, *Comparative study of oxidation of dye-Reactive Black B by different advanced oxidation processes: Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton*, Journal of Hazardous Materials, 154(1-3), 655 (2008); <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.077>.
- [4] M. M. Haque, W. T. Smith, D. K. Y. Wong, *Conducting polypyrrole films as a potential tool for electrochemical treatment of azo dyes in textile wastewaters*, Journal of Hazardous Materials, 283, 164 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.038>.
- [5] S. Hussain, E. Aneggi, D. Goi, *Catalytic activity of metals in heterogeneous Fenton-like oxidation of wastewater contaminants: a review*, Environmental Chemistry Letters, 19(3), 2405 (2021); <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01185-z>.
- [6] E. Neyens, J. Baeyens, *A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique*, Journal of Hazardous Materials, 98 (1-3), 33 (2003); [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(02\)00282-0](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(02)00282-0).
- [7] M. Xu, C. Wu, Y. Zhou, *Advancements in the Fenton Process for Wastewater Treatment*, In book: Advanced Oxidation Processes - Applications, Trends, and Prospects, Ed. by C. Bustillo-Lecompte, Ch. 4, 1 (IntechOpen Ltd, 2020); <https://doi.org/10.5772/intechopen.90256>.
- [8] M. Cheng, C. Lai, Y. Liu, et al., *Metal-organic frameworks for highly efficient heterogeneous Fenton-like catalysis*, Coordination Chemistry Reviews, 368 (1), 80 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.04.012>.
- [9] C. Wang, Y. Cao, H. Wang, *Copper-based catalyst from waste printed circuit boards for effective Fenton-like discoloration of Rhodamine B at neutral pH*, Chemosphere, 230, 278 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.068>.
- [10] Y. Wang, H. Zhao, G. Zhao, *Iron-copper bimetallic nanoparticles embedded within ordered mesoporous carbon as effective and stable heterogeneous Fenton catalyst for the degradation of organic contaminants*, Applied Catalysis B: Environmental, 164, 396 (2015); <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.09.047>.

- [11] S. Zaman, A. Zainelabdin, G. Amin, et al., *Efficient catalytic effect of CuO nanostructures on the degradation of organic dyes*, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 73(11), 1320 (2012); <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpcs.2012.07.005>.
- [12] N. Thomas, D. D. Dionysiou, S. C. Pillai, *Heterogeneous Fenton Catalysts: A Review of Recent Advances*, Journal of Hazardous Materials, 404 (Pt. B), 124082 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124082>.
- [13] X. Zhang, Q. Zhang, T. Yang, et al., *Research progress of heterogeneous Fenton catalyst for organic wastewater treatment: Thesis*, IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 651(4), 042025 (2021); <https://doi.org/10.1088/1755-1315/651/4/042025>.
- [14] A. D. Bokare, W. Choi, *Review of iron-free Fenton-like systems for activating H₂O₂ in advanced oxidation processes*, Journal of Hazardous Materials, 275, 121 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.054>.
- [15] M. Silva, J. Baltrus, C. Williams, et al., *Mesoporous Fe-doped MgO nanoparticles as a heterogeneous photo-Fenton-like catalyst for degradation of salicylic acid in wastewater*, Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(4), 105589 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105589>.
- [16] O. Makido, G. Khovanets', V. Kochubei, I. Yevchuk, *Nanostructured Magnetically Sensitive Catalysts for the Fenton System: Obtaining, Research, Application*, Chemistry and Chemical Technology, 16(2), 227 (2022); <https://doi.org/10.23939/chcht16.02.227>.
- [17] D. Melgoza, A. Hernández-Ramírez, J. M. Peralta-Hernández, *Comparative efficiencies of the decolourisation of Methylene Blue using Fenton's and photo-Fenton's reactions*, Photochemical & Photobiological Sciences, 8(5), 596 (2009); <https://doi.org/10.1039/b817287k>.
- [18] O. Yu. Makido, Yu. G. Medvedevskikh, G. I. Khovanets', *Investigation into the adsorption of methylene blue on the surface of a «core-shell» type catalyst for the Fenton system*, Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii, 6(133), 91 (2020); <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-91-98>.
- [19] K. Maresz, A. Ciemięga, P. Bezkosty, et al., *Insight into Structural and Physicochemical Properties of ZrO₂-SiO₂ Monolithic Catalysts with Hierarchical Pore Structure: Effect of Zirconium Precursor*, Catalysts, 13(12), 1516 (2023); <https://doi.org/10.3390/catal13121516>.
- [20] H. Wang, J. Huang, L. Ding, et al., *A facile synthesis of monodisperse CoFe₂O₄/SiO₂ nanoparticles*, Applied Surface Science, 257(16), 7107 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.03.063>.
- [21] R. Asokarajan, K. Neyvasagam, A. Milton Franklin Benial, *Simple Synthesis and Characterization Studies of CoFe₂O₄ Nanocrystalline by Co-precipitation process*, International Journal of Current Research, 5(2), 113 (2013).
- [22] P. Arévalo-Cid, J. Isasi, F. Martín-Hernández, *Comparative study of core-shell nanostructures based on amino-functionalized Fe₃O₄@SiO₂ and CoFe₂O₄@SiO₂ nanocomposites*, Journal of Alloys and Compounds, 766, 609 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.246>.
- [23] H. Li, L. Ban, Z. Wang, et al., *Regulation of Cu Species in CuO/SiO₂ and Its Structural Evolution in Ethynylation Reaction*, Nanomaterials, 9 (6), 842 (2019); <https://doi.org/10.3390/nano9060842>.
- [24] W. Ho, Q. Tay, H. Qi, et al., *Photocatalytic and Adsorption Performances of Faceted Cuprous Oxide (Cu₂O) Particles for the Removal of Methyl Orange (MO) from Aqueous Media*, Molecules, 22(4), 677 (2017); <https://doi.org/10.3390/molecules22040677>.
- [25] M. Silva, J. P. Baltrus, C. Williams, et al., *Heterogeneous Photo-Fenton-like Degradation of Emerging Pharmaceutical Contaminants in Wastewater using Cu-doped MgO Nanoparticles*, Applied Catalysis A: General, 630, 118468 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118468>.

O.Yu. Makido¹, G.I. Khovanets'¹, O.G. Kurylets²

Influence of the medium pH on the catalytic activity of the CuO-based catalyst in the Fenton system

¹Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of the Institute of Physical–Organic Chemistry and Coal Chemistry named after L. M. Lytvynenko of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine, khovanets_galina@ukr.net.

²Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

The influence of the medium pH on the activity of the heterogeneous nanostructured magnetically sensitive catalyst SiO₂/CoFe₂O₄/SiO₂/CuO in the Fenton system was investigated and the reaction mechanism was proposed. It was determined that the catalytic centers are Cu⁺ and Cu²⁺. It was established that the rate of destruction of the dye methylene blue (MB) as a model wastewater pollutant in the first 20 min of the process depends on pH, and its value decreases in the pH range (9)>(6)>(3). After 2 h, for all initial pH values, the degree of MB destruction reaches 85-90%, and the pH changes to neutral. The proposed system can be used in the technology of post-treatment of industrial and domestic wastewater.

Keywords: SiO₂/CoFe₂O₄/SiO₂/CuO catalyst, Fenton system, medium pH, oxidation of methylene blue, reaction mechanism.