

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРИТИЗАЦІЙНОЇ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД ВІД ІОНІВ ЗАЛІЗА З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВОЮ ОБРОБКОЮ

Андрій Гриб¹, Дмитро Самченко²

Київський національний університет будівництва та архітектури
31, проспект Повітряних Сил, м. Київ, Україна, 03037

¹ аспірант, grib_andrey@ukr.net, orcid.org/0009-0001-3953-6625

² канд. тех. наук, sama30071988@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3305-8180

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.51.21-28

Анотація. У статті представлено дослідження феритизаційної очистки відпрацьованих травильних розчинів, які містять високі концентрації іонів заліза, із застосуванням ультразвукової обробки реакційної суміші. Вивчено вплив способу активації та тривалості процесу на процес вилучення іонів заліза, фазовий склад феритних осадів і ефективність освітлення суспензії. Вимірювання концентрацій іонів заліза в розчинах здійснювалося спектрофотометричним методом. Фазовий склад осадів феритизації визначали рентгенофазовим аналізом. Встановлено, що традиційна термічна активація сприяє швидкому осадженню та кристалізації феритних фаз, тоді як ультразвукова обробка забезпечує інтенсивне диспергування та формування дрібнодисперсних частинок. Значення рН очищених розчинів після феритизації перебуває у межах $6.12 \div 6.84$, що відповідає нормативним вимогам для скиду у каналізаційні системи та використання в оборотних системах водопостачання на промислових підприємствах. Метод феритизації дозволяє досягти високого ступеня видалення іонів заліза (до 99.96 %) і зменшити утворення токсичних осадів, що робить його перспективним для повторного використання води або безпечного скиду у водовідведення. Результати дослідження демонструють ефективність ультразвукової активації як інструмента підвищення контролю над структурними властивостями феритних осадів, що забезпечує додаткові екологічні та економічні переваги. Робота має практичну значущість для впровадження ресурсоефективних та екологічно безпечних технологій очистки промислових стічних вод та сприяє розвитку принципів сталого розвитку у металургійній та гальванічній промисловості.

Ключові слова: промислові стічні води, гальванічні виробництва, іони заліза, феритизація, ультразвукова обробка, феритні осадки.

ВСТУП

Якість водних ресурсів посідають провідне місце серед сучасних екологічних викликів, оскільки саме вода є ключовим фактором сталого розвитку суспільства та економіки [1]. Інтенсивне зростання промислового виробництва протягом останніх десятиліть зумовило істотне збільшення обсягів утворення стічних вод, які містять сполуки важких металів. За даними [2], промислові стічні води є одними із головних джерел забруднення водних екосистем, серед яких особливо небезпечними вважаються відходи гальванічних виробництв. Ця галузь

характеризується значним водоспоживанням і формуванням висококонцентрованих стічних вод, що містять іони важких металів (Cu, Ni, Zn, Cr, Pb та ін.). Потрапляючи у водойми важкі метали порушують баланс екосистем і становлять потенційну небезпеку для здоров'я людини [3].

Традиційно для очистки стічних вод гальванічних підприємств застосовують фізико-хімічні методи, зокрема реагентне осадження [4, 5]. Перевагами цього методу є універсальність та простота процесу, однак він має низку суттєвих недоліків: значне споживання реагентів, утворення великої

кількості осадів, низька швидкість процесів коагуляції та агрегації гідроксидів металів [6]. Окрім того, утворені цим методом відходи потребують подальшої утилізації або тривалого зберігання, що створює додаткове екологічне навантаження на довкілля [7]. Впровадження більш ефективних, ресурсощадних і екологічно безпечних технологій очистки стічних вод є необхідною умовою для переходу промисловості до принципів циркулярної економіки.

Одними з найперспективніших методів для очистки багатокомпонентних та висококонцентрованих стічних вод, які містять сполуки важких металів є метод феритизації [8]. Метод феритизації передбачає перетворення іонів важких металів у стабільні кристалічні ферити за участю солей заліза, лужних реагентів і кисню повітря [9]. Отримані феритні фази характеризуються низькою розчинністю, високою хімічною та термічною стійкістю, а також можливістю подальшого використання як вторинної сировини [10]. Таким чином, феритизація дозволяє не лише ефективно вилучати токсичні метали зі стічних вод, а й мінімізувати проблему утворення небезпечних шламів. Разом з тим традиційна технологія феритизації має низку обмежень: високі енерговитрати (понад 75 °C) та значні витрати на реагенти [11]. У зв'язку з цим актуальним є пошук альтернативних способів інтенсифікації процесу, що дозволили б здійснювати феритизацію за нижчих температур і зменшити споживання хімічних реагентів. Екологічно та економічно доцільною альтернативою заміною прекурсорів сульфату заліза та лужних реагентів може слугувати використання відпрацьованих розчинів травлення та знежирення металевих виробів. Все це дозволяє не лише зменшити витрати на реагенти, а й вирішити проблему утилізації токсичних відходів металургійного та гальванічного виробництва.

Сучасні дослідження пропонують різні підходи до активації феритизаційного процесу: використання електромагнітних імпульсних розрядів [12], ультрафіолетового та мікрохвильового випромінювання [13]. Кожен із цих методів має певні переваги, зокрема можливість прискорення окиснення

Fe^{2+} до Fe^{3+} , покращення кристалізації феритних фаз та підвищення ефективності процесу. Однак, їх практичне впровадження стримується через високу вартість обладнання, складність апаратного оформлення та низьку продуктивність у промислових масштабах.

Перспективним альтернативним напрямом є використання ультразвукової обробки [14]. Ультразвук здатний інтенсифікувати процеси диспергування та кристалізації за рахунок мікрокавітаційних ефектів, забезпечуючи більш повне перетворення іонів важких металів у феритні сполуки [15]. Очікується, що поєднання феритизації з ультразвуковим диспергуванням дозволить знизити енерговитрати, скоротити тривалість процесу та водночас підвищити якість отриманих феритних осадів. Це робить підхід актуальним у контексті очистки промислових стічних вод.

Для досягнення поставленої мети було поставлено завдання дослідити вплив ультразвукової обробки в процесі феритизації на якість вилучення іонів заліза в стійкі феритні осадки та оцінити його ефективність порівняно з традиційною термічною феритизацією.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для очистки відпрацьованого сірчанокислотного розчину травлення сталевих поверхонь в дослідженнях використовували метод феритизації. Процес феритизації проводився при вихідній концентрації іонів заліза в розчині, що сягає значенню 15 г/дм³. Коригування величини рН провадили 50 %-им розчином гідроксиду натрію до значення 10.5. Тривалість проведення процесу феритизації становила від 10 до 50 хв.

Досліджувався процес феритизаційної очистки відпрацьованих травильних розчинів, як з традиційною термічною активацією реакційної суміші при температурі 70 °C при постійному перемішуванні з верхньопривідною мішалкою DLS F201A0155 при числі обертів 250 об/хв, так із активацією – ультразвуком. Для досліджень ультразвукової обробки використовували ультразвукову

ванну марки TUN при потужності ультразвуку в 70 Вт та частоті 40 кГц. Крім того, в дослідження застосовували ультразвуковий диспергатор зондового типу УЗДН – М1200Т при потужності ультразвуку в 70 Вт та частоті 22 кГц. В експериментах використовували реактори з робочим об'ємом 0,5 дм³.

Для прискорення процесів окиснення реакційної суміші Fe^{2+} в Fe^{3+} в феритизаційному процесі застосовували на заміну

аерації киснем повітря 35 % розчин пероксиду водню, який спричиняє реакцію Фентона. Фентонова реакція є прикладом передових окиснювальних процесів, які зазвичай базуються на утворенні високоактивних сполук, таких як гідроксильні радикали ($\text{OH}^\cdot$) [16]. Об'єм дозування H_2O_2 в дослідженнях сягав 0.2 % від об'єму реакційної суміші. Умови проведення феритизаційних досліджень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Умови проведення феритизаційних досліджень

Table 1. Conditions of ferritization studies

Номер дослідів	Тривалість процесу, хв	Вихідна концентрації реакційної суміші, г/дм ³	рН реакційної суміші
1	10	15,0	10,5
2	20		
3	30		
4	40		
5	50		

Концентрацію іонів заліза в очищеній воді визначали на спектрофотометрі Nach DR3900. Величина рН реакційної суміші до і після процесу феритизації визначалась на рН-метрі PL-700AL.

Отриманий феритний осад зневоднювався протягом 2 хв на центрифугі СМ-5 з фактором розділення 3600 та висушувався при температурі 105 °С протягом доби в електросушильній шафі СНОЛ 67/350. Висушений осад подрібнювався в порошок за допомогою фарфорової ступки.

Фазовий аналіз порошку висушених осадів здійснювався методом рентгенівської дифракції на дифрактометрі Rigak Ultima IV з використанням $\text{Cu-K}\alpha$ випромінювання. Зйомка проводилась в інтервалі кутів 2θ від 6 до 65° з кроком сканування 0,05° та часом експозиції в точці 2 с.

Ефективність освітлення суспензії після феритизації проводили в мірному циліндрі тривалістю 60 хв.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження феритизаційної очистки відпрацьованих травильних розчинів з

ультразвуковою обробкою полягало у вилученні з них іонів Fe^{2+} і Fe^{3+} ($\text{Fe}^{\text{заг}}$) та переведенні їх в стійкі осади з визначенням найкращої тривалості процесу.

В роботі основну увагу було зосереджено на кінетиці вилучення іонів заліза з травильних розчинів методом феритизації за різних способів активації реакційної суміші. Результати дослідження впливу цього параметра на ефективність вилучення іонів заліза наведено на рисунку 1.

Як видно з наведених даних (рис. 1), залишкові концентрації $\text{Fe}^{\text{заг}}$ після феритизації перебувають у діапазоні 1,67...6,79 мг/дм³. Загалом зі збільшенням тривалості процесу феритизації спостерігається зниження залишкової концентрації іонів заліза в очищеному розчині, за винятком випадку активації реакційної суміші в ультразвуковій ванні з частотою 40 кГц. У цьому випадку, навпаки, збільшення тривалості процесу призводить до підвищення залишкової концентрації іонів заліза. Така особливість, ймовірно, пов'язана зі структурними перетвореннями залізовмісних фаз у реакційній суміші в процесі феритизації.

У проведених дослідженнях мінімальна досягнута концентрація іонів заліза в очищеному розчині становила 2,67 мг/дм³. Це свідчить про те, що отримані розчини не відповідають нормативним вимогам до якості води для скиду в системи централізованого водовідведення, де гранично допустима концентрація іонів заліза становить 2,5 мг/дм³. Враховуючи високу початкову концентрацію іонів заліза в стічній воді, метод феритизації забезпечує високий ступінь очищення, який досягає 99,96 %.

З огляду на зазначене, подальші дослідження доцільно спрямувати на досягнення

більш високого рівня очистки травильних розчинів з метою їх повторного використання у виробництві або скиду в каналізаційну систему. Для цього необхідно оптимізувати параметри феритизації, насамперед шляхом збільшення об'єму дозування H₂O₂ та інтенсифікації ультразвукової обробки за рахунок підвищення її потужності.

В процесі феритизації при різних способах її активації в реакційній суміші формується дисперсна суспензія, яка в подальшому кристалізується з утворенням, головним чином, щільних феритних структур.

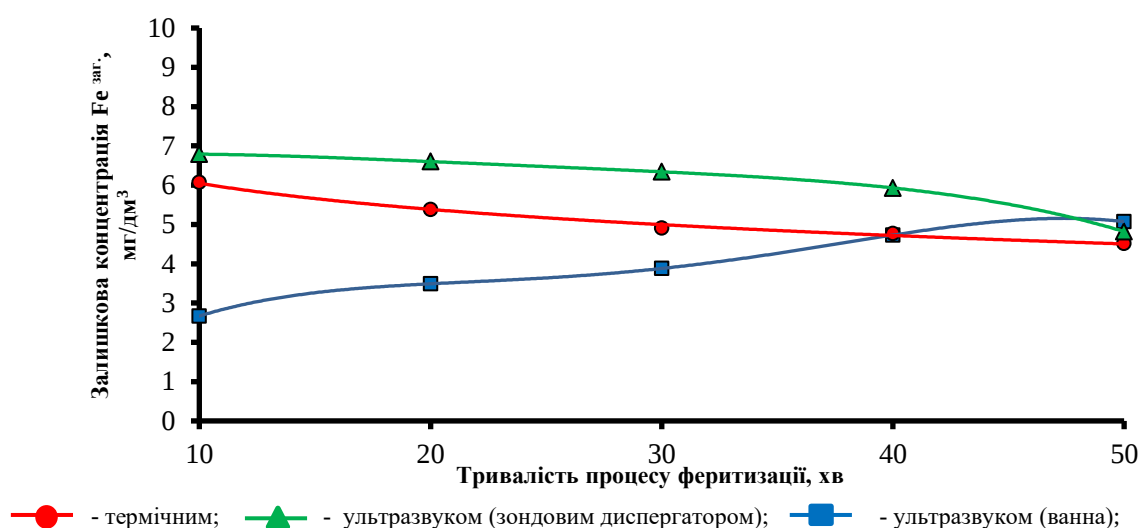


Рис. 1 Результати вилучення іонів заліза з відпрацьованих травильних розчинів феритизацією при різних способах активації реакційної суміші

Fig. 1. Results of iron ion removal from spent etching solutions by ferritization using different activation methods of the reaction mixture

Проведений аналіз кольору зразків висушених осадів, отриманих при різних способах активації реакційної суміші з 50 хв тривалістю феритизації (рис. 2), показав, що всі зразки мають насичений чорний колір. Темно чорне забарвлення може свідчити про домінування у фазовому складі осадів магнетиту.

Результати якісного аналізу осадів феритизації свідчать про високу кристалічність отриманих зразків (рис. 3). У зразках феритизаційних осадів було ідентифіковано хімічно стабільну феромагнітну фазу магнетиту Fe₃O₄ з параметром кристалічної ґратки 8,36 Å. Аналіз дифракційних даних показав, що зразок, отриманий термічним способом



Рис. 2. Осади феритизації: *a* – ультразвуком (зондовим диспергатором); *b* – термічною; *c* – ультразвуком (ванна)

Fig. 2. Ferritization sediments: (a) ultrasonic (probe disperser); (b) thermal; (c) ultrasonic (bath)

активації, характеризується більш високим ступенем кристалічності порівняно з іншими досліджуваними зразками. Це

підтверджується зростанням інтенсивності та зменшенням ширини дифракційних рефлексів при $2\Theta = 35,4^\circ$ з індексом (311).

В інших зразках отриманих ультразвуковою обробкою спостерігалися менш інтенсивні та розширені дифракційні піки, що свідчить про нижчий ступінь впорядкованості структури. Проте, зразок осаду який отримано ультразвуковою обробкою зондового типу характеризується більш високим ступенем кристалічності порівняно із зразком ультразвукової ванни. Це свідчить про перспективність подальших досліджень саме обробкою реакційної суміші ультразвуком зондового типу.

Результати кількісного фазового аналізу осадів, підтверджують наші припущення, щодо формування максимальної кількості хімічно стійкої фази магнетиту. Ідентифікація фаз в отриманих зразках (рис. 3) показали, що в них містяться 100 % фаза Fe_3O_4 .

Ефективність освітлення суспензії на очисних спорудах визначає якість відділення твердих фаз зі стічних вод та безпосередньо впливає на стабільність роботи всієї системи очищення. Таким чином, було проведено дослідження ефективності освітлення суспензії після процесу феритизації при різних їх способах активації реакційної суміші (рис. 4). Отримані результати свідчать, що тривалість феритизації та спосіб активації суттєво впливають на ефективність освітлення суспензії. При термічній активації збільшення тривалості феритизації покращує ефективність освітлення суспензії, яка зростає з 13 до 35 %. Проте, при ультразвуковій обробці збільшення часу процесу з 10 до 50 хв призводить до зниження ефективності освітлення суспензії з 6 до 1 %.

Це можна пояснити тим що, термічний метод сприяє кристалізації феритних фаз та агрегації частинок, що забезпечує швидке осадження твердих фаз і скорочує час освітлення водної фази. Ультразвукова обробка, навпаки, забезпечує інтенсивне диспергування, що призводить до формування значної кількості дрібнодисперсних частинок.

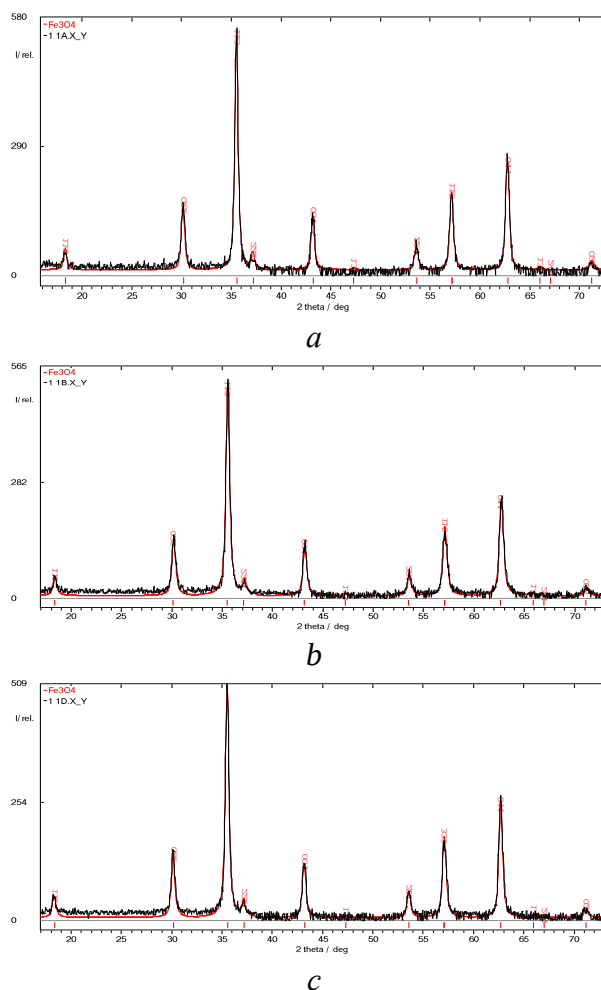


Рис. 3. Дифрактограми досліджуваних осадів феритизації, спосіб активації: *a* – термічним; *b* – ультразвуком (зондовим диспергатором); *c* – ультразвуком (ванна)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of ferritization sediments depending on activation method: (a) thermal activation; (b) ultrasonic treatment (probe disperser); (c) ultrasonic treatment (bath)

Ультразвукова обробка уповільнює процес освітлення через повільне осадження суспензії, що збільшує час освітлення порівняно з термічним методом. Разом із цим ультразвукова обробка забезпечує формування феритних осадів із однаковим розміром частинок, що є важливою перевагою порівняно з продуктами, отриманими термічним способом.

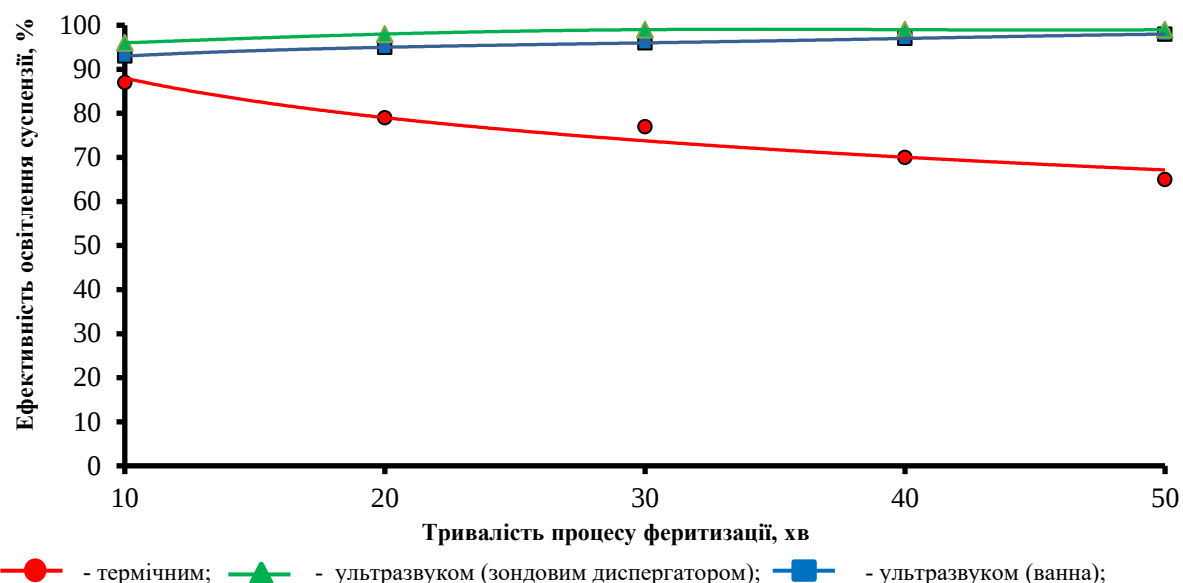


Рис. 4 Результати ефективності освітлення суспензії після процесу феритизації

Fig. 4. Suspension clarification efficiency of the ferritization process

У роботі також досліджувався показник рН очищеної стічної води після феритизації, значення якого регламентується нормами ГДК для скиду у каналізаційну систему (6,5...9,5) та в оборотних системах водопостачання на підприємствах (6,5...8,5). Встановлено, що після проведення процесу феритизації, незалежно від способу активації та кінетики процесу, освітлений водний розчин має рН у межах 6,12...6,84, максимальне значення якого відповідає вимогам ГДК.

ВИСНОВКИ

Дослідження показали, що метод феритизації є перспективним методом для очистки висококонцентрованих травильних розчинів від іонів заліза, забезпечуючи перетворення їх у хімічно стійкі феритні осади магнетиту (Fe_3O_4). Тривалість процесу та спосіб активації реакційної суміші значно впливають на ступінь вилучення іонів заліза та ефективність освітлення суспензії. Термічна активація сприяє швидкому осадженню та кристалізації феритних фаз, тоді як ультразвукова обробка формує дрібнодисперсні частинки осадів. Значення рН очищених розчинів після феритизації перебуває в межах 6,12...6,84, що відповідає нормативним вимогам ГДК для скиду в каналізацію та використання в оборотних системах

водопостачання. Запропонований підхід дозволяє значно знизити концентрацію іонів заліза до 99,96 % і є перспективним для повторного використання води або безпечного скиду у каналізаційні системи, а також сприяє мінімізації утворення токсичних осадів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Плетенецька С. М., Яценко В. С. Економіка використання водних ресурсів: екологічний аспект // Вчені записки Університету «КРОК». 2018. №3(51). С. 91-95.
2. Феденко Ю. М., Синіцька В. В. Особливості очищення стічних вод гальванічних виробництв від важких металів на прикладі шестивалентного хрому. екологічні аспекти // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 4(87). С. 182 – 187.
3. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review / Hama Aziz K. H., Mustafa F. S., Omer K. M., Hama S., Hamarawf R. F., Rahman K. O. // RSC Adv. 2023. Vol. 13(26). P. 17595 – 17610.
4. Circular Economy Approach in Treatment of Galvanic Wastewater Employing Membrane Processes / Kowalik-Klimczak A., Gajewska-Midzialek A., Buczek Z., ... Gorewoda T. // Membranes (Basel). 2023. Vol. 13(3). 325.
5. Removal of Zinc from Concentrated Galvanic Wastewater by Sodium Trithiocarbonate: Process Optimization and Toxicity Assessment / Thomas

M., Melichová Z., Šuránek M., Kuc J., Więckol-Ryk A., Lochyński P. // *Molecules*. 2023. Vol. 28(2). 546.

6. **Heavy** metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process– a systematic review / Bazrafshan E., Mohammadi L., Ansari-Moghaddam A. et al. // *J Environ Health Sci Engineer*. 2015. Vol. 13. 74.

7. **Evaluation** of the stability of heavy metal-containing sediments obtained in the wastewater treatment processes with the use of various precipitating agents / Lejwoda P., Świnder H., Thomas M. // *Environ Monit Assess*. 2023. Vol. 195(4). 442.

8. **Improvement** of the ferritisation method for removal of nickel compounds from wastewater / Kochetov G., Samchenko D., Naumenko I. // *Givil and Environmental Engineering*. 2014. Vol. 5. P.143-148.

9. **Феритизаційна** переробка відпрацьованих технологічних розчинів, що містять сполуки цинку та нікелю / Кочетов Г. М., Наumenko I. В. Самченко Д. М. // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2014. Вип. 24. С. 59-66.

10. **Вивчення** стійкості відходів очистки промислових стічних вод у складі лужних цементів / Колодько А. О., Кочетов Г. М., Самченко Д. М. Пасько А.В. // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2016. Вип. 28. С. 180–186.

11. Synthesis, Characterization, Applications, and Challenges of Iron Oxide Nanoparticles. Nanotechnology / Attarad Ali, J.S.A., Hira Zafar, ... Hussain, A. // *Science and Applications*. 2016, Vol. 9. P. 49–67.

12. Кочетов Г.М., Самченко Д.М. Удосконалена феритизаційна переробка стічних вод: електромагнітна імпульсна активація процесу // *Водопостачання та водовідведення*. 2015. Вип. 3. С. 20 – 26.

13. Advanced Treatment of Pesticide-Containing Wastewater Using Fenton Reagent Enhanced by Microwave Electrodeless Ultraviolet / Cheng G., Lin J., ... Fu J. // *Biomed Res Int*. 2015. 205903.

14. Zhang W., Abdelrasoul G. N., Savchenko O., Abdrabou A., Wang Z., Chen J. Ultrasound-assisted magnetic nanoparticle-based gene delivery, 2020.

15. Tang S. C. N., Lo I. M. C. Magnetic nanoparticles: Essential factors for sustainable environmental applications // *Water Research*. 2013, Vol. 47(8), P. 2613–2632.

16. **Toxicity** Reduction of Industrial and Municipal Wastewater by Advanced Oxidation Processes (Photo-Fenton, UVC/H₂O₂ / Rueda-Márquez J.J., Levchuk I., Manzano M., Sillanpää M. // *Electro-Fenton and Galvanic Fenton): A Review. Catalysts*. 2020. Vol. 10. 612.

REFERENCES

1. **Pletenetska, S. M., & Yatsenko, V. S. (2018).** *Ekonomika vykorystannia vodnykh resursiv: ekolohichniyi aspekt. Vcheni zapysky Universytetu «KROK»*, 3(51), 91–95. Retrieved from <https://library.krok.edu.ua/ua/kategoriji/statti/899-ekonomika-vykorystannia-vodnykh-resursiv-ekolohichniyi-aspekt> [in Ukrainian]

2. **Fedenko, Yu. M., & Synytska, V. V. (2023).** Osoblyvosti ochyshchennia stichnykh vod halvanichnykh vyrobnytstv vid vazhkykh metaliv na prykladi shestivalentnoho khromu: ekolohichni aspekty. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 4(87), 182–187. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.21> [in Ukrainian]

3. **Hama Aziz, K. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., & Rahman, K. O. (2023).** Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. *RSC Advances*, 13(26), 17595–17610. <https://doi.org/10.1039/d3ra00723e>

4. **Kowalik-Klimczak, A., Gajewska-Midzialek, A., Buczek, Z., & Gorewoda, T. (2023).** Circular economy approach in treatment of galvanic wastewater employing membrane processes. *Membranes*, 13(3), 325. <https://doi.org/10.3390/membranes13030325>

5. **Thomas, M., Melichová, Z., Šuránek, M., Kuc, J., Więckol-Ryk, A., & Lochyński, P. (2023).** Removal of zinc from concentrated galvanic wastewater by sodium trithiocarbonate: process optimization and toxicity assessment. *Molecules*, 28(2), 546. <https://doi.org/10.3390/molecules28020546>

6. **Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., & Mahvi, A. H. (2015).** Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process – a systematic review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13, 74. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0233-8>

7. **Lejwoda, P., Świnder, H., & Thomas, M. (2023).** Evaluation of the stability of heavy metal-containing sediments obtained in the wastewater treatment processes with the use of various precipitating agents. *Environmental Monitoring and*

- Assessment, 195(4), 442.
<https://doi.org/10.1007/s10661-023-11036-9>
8. Kochetov, G., Samchenko, D., & Naumenko, I. (2014). Improvement of the ferritisation method for removal of nickel compounds from wastewater. *Civil and Environmental Engineering*, 5, 143–148. Retrieved from
https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=l40DxQ0AAAAJ&citation_for_view=l40DxQ0AAAAJ:4TOpqG69KYC [in Ukrainian]
 9. Kochetov, H.M., Naumenko, I.V., & Samchenko, D.M. (2014). Ferytyzatsiina pererobka vidpratsovanykh tekhnolohichnykh rozchyniv, shcho mistiat spoluky tsynku ta nikeliu. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, 24, 59–66. [in Ukrainian]
 10. Kolodko, A.O., Kochetov, H.M., Samchenko, D.M., & Pasko, A.V. (2016). Vyvchennia stiikosti vidkhodiv ochystky promyslovykh stichnykh vod u skladi luzhnykh tsementiv. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, 28, 180–186. [in Ukrainian]
 11. Ali, A., Zafar, H., Zia, M., ul Hag, I., Phull, A. R., Ali, J. S., & Hussain, A. (2016). Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology Science and Applications*, 9, 49–67.
<https://doi.org/10.2147/nsa.s99986>
 12. Kochetov, H.M., & Samchenko, D.M. (2015). Udoskonalena ferytyzatsiina pererobka stichnykh vod: elektromahnitna impul'sna aktyvatsiia protsesu. *Vodopostachannia ta vodovidvedennia*, 3, 20–26. [in Ukrainian]
 13. Cheng, G., Lin, J., Lu, J., Zhao, X., Cai, Z., & Fu, J. (2015). Advanced treatment of pesticide-containing wastewater using Fenton reagent enhanced by microwave electrodeless ultraviolet. *BioMed Research International*, 2015, 1-8.
<https://doi.org/10.1155/2015/205903>
 14. Zhang, W., Abdelrasoul, G. N., Savchenko, O., Abdrabou, A., Wang, Z., & Chen, J. (2020). Ultrasound-assisted magnetic nanoparticle-based gene delivery.
<https://doi.org/10.1101/2020.03.31.018440>
 15. Tang, S. C. N., & Lo, I. M. C. (2013). Magnetic nanoparticles: essential factors for sustainable environmental applications. *Water Research*, 47(8), 2613–2632.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.039>
 16. Rueda-Márquez, J.J., Levchuk, I., Manzano, M., & Sillanpää, M. (2020). Toxicity reduction of industrial and municipal wastewater by advanced oxidation processes (Photo-Fenton, UVC/H₂O₂, Electro-Fenton and Galvanic Fenton): a review. *Catalysts*, 10, 612.
<https://doi.org/10.3390/catal10060612>

Study of Wastewater Treatment from Iron Ions using Ultrasonic treatment

Andrii Hryb, Dmitry Samchenko

Abstract. The article presents a study on ferritization-based treatment of spent etching solutions containing high concentrations of iron ions, with application of ultrasonic processing of the reaction mixture. Effects of activation method and process duration on iron ion removal, phase composition of ferrite precipitates and suspension clarification efficiency were studied. Concentration of iron ions in solutions were measured using spectrophotometry, phase composition of ferritization sediments was determined by X-ray diffraction analysis. It was found that conventional thermal activation promotes rapid precipitation and crystallization of ferrite phases, whereas ultrasonic treatment provides intensive dispersion and the formation of fine particles. The pH values of treated solutions by ferritization ranged from 6.1 to 6.8, meeting the standard requirements for discharge into sewer systems or reuse in industrial water supply cycles. The ferritization method enables a high degree of iron ion removal (up to 99.96%) and reduces the formation of toxic sludge, making it a promising approach for water reuse or safe wastewater discharge. The results demonstrate the effectiveness of ultrasonic activation as a tool for improved control over the structural properties of ferrite precipitates, providing additional environmental and economic benefits. The study has practical significance for the implementation of resource-efficient and environment friendly technologies for industrial wastewater treatment and contributes to the advancement of sustainable development principles in the metallurgical and electroplating industries.

Keywords: industrial wastewater, electroplating industry, iron ions, ferritization, ultrasonic treatment, ferrite sediments.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2025