

АНАЛІЗ ФЕРИТИЗАЦІЙНОЇ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД ВІД ІОНІВ НІКЕЛЮ: ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТА МЕТОДІВ АКТИВАЦІЇ

Михайло Фортуненко¹, Геннадій Кочетов²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна

¹ michael.fortunenko@gmail.com, orcid.org/0009-0006-6864-623X

² докт. тех. наук, gkochetov@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0041-7335

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.51.60-68

Анотація. Гальванічні виробництва формують значні обсяги стічних вод із підвищеним вмістом іонів нікелю (Ni^{2+}), що вирізняється токсичністю, біоаккумуляцією та стійкістю у водному середовищі. Це зумовлює потребу в технологіях, здатних не лише ефективно знижувати концентрацію забруднювача, а й переводити його у хімічно стабільну, маловилуговану тверду фазу. Традиційні методи (гідроксидне осадження, іонний обмін, мембранні та електрохімічні процеси) часто потребують значних витрат реагентів/енергії та генерують нестійкі осади, чутливі до коливань складу стічних вод. На цьому тлі феритизація – цілеспрямоване формування шпінельних феритів NiFe_2O_4 за участю сполук заліза – є перспективним підходом, що поєднує високий ступінь вилучення Ni^{2+} , утворення малорозчинної феромагнітної фази та спрощене відокремлення (магнітна сепарація/ущільнення). Систематизовано дані про вплив ключових параметрів (співвідношення іонів заліза та нікелю, рівень pH, температура, тривалість контакту, аерація/окисники) на ефективність процесу та властивості отриманих продуктів феритизації (феритних осадів); узагальнено відомості про зовнішні фізичні впливи, що інтенсифікують процес (ультразвук, ультрафіолет, електромагнітна обробка). Показано, що «класична» феритизація часто вимагає підвищених температур ($>60\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$), тоді як застосування методів інтенсифікації потенційно знижують енерговитрати й скорочує тривалість досягнення цільового ступеня очистки без втрати стабільності продуктів феритизації. Окрему увагу приділено інженерним засадам масштабування (каскад реакторів безперервного перемішування (РБП), статичні міксери, контроль рівня pH та окисно-відновного потенціалу (ОВП), режим аерації, вбудована магнітна сепарація) та питанням довготривалої екологічної безпечності осадів. У результаті критичного аналізу джерел виявлено науково-практичні прогалини, а саме: уніфікацію технологічних режимів очистки для різних типів стічних вод, верифікацію енергобалансів на пілотному рівні масштабування та оцінку вилуговування продуктів феритизації перед утилізацією/ресурсним використанням.

Ключові слова: гальванічні виробництва, стічні води, іони нікелю, феритизація, активація.

ВСТУП

Гальванічні стічні води, що містять іони нікелю (Ni^{2+}), характеризуються складним іонно-комплексним складом через токсичність Ni^{2+} та стійкість його комплексних форм у технологічних електролітах, на відміну від модельних розчинів. Традиційні підходи (карбонатне/гідроксидне осадження, сорбція, іонообмін) забезпечують зниження концентрацій, але супроводжуються утворенням значних обсягів

малоствільних шламів і чутливістю до флуктуацій складу стічних вод. На цьому тлі феритизація – цілеспрямоване формування шпінельних феритів нікелю (NiFe_2O_4) за участі сполук заліза, розглядається як перспективний шлях до одночасного вилучення Ni^{2+} та стабілізації його в нерозчинній твердій фазі, яку легко відокремити на магнітних фільтрах. Промислова привабливість феритизації зумовлена поєднанням декількох факторів: селективним включенням нікелю у

кристалічну структуру феритів; можливістю швидкого розділення фаз (осадження/магнітна сепарація); підвищеною екологічною стійкістю продуктів феритизації (низьке виловування за стандартними випробуваннями). Водночас ключовими технологічними чинниками лишаються вимоги до підтримання рівня рН, контроль окисно-відновних умов та підвищені температури процесу, що збільшують енерговитрати і ускладнюють масштабування.

Це стимулює інтерес до зовнішніх фізичних впливів для інтенсифікації феритизації з використанням ультразвукової (УЗ), ультрафіолетової (УФ) та електромагнітної (ЕМ) активації реакційної суміші. Такі впливи потенційно прискорюють гідроліз/окиснення заліза та кристалізацію феритів, поліпшують агрегаційні властивості частинок і, відповідно, дають змогу знизити температурні та часові вимоги без втрати ефективності вилучення нікелю.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього дослідження є систематизація та критичний аналіз сучасних відомостей щодо очистки гальванічних стічних вод від іонів нікелю методом феритизації, а також вивчення можливостей інтенсифікації цього процесу за допомогою енергоефективних методів активації. Проведений критичний аналіз літературних даних буде сприяти плануванню експериментів з вдосконалення переробки відпрацьованих нікельовмісних розчинів.

У статті систематизовано та критично проаналізовано публікації з феритизації

нікельовмісних гальванічних стічних вод із фокусом на процесні параметри (співвідношення іонів заліза та нікелю, рівень рН, температура, час перебігу процесу, окисники) та підходи до інтенсифікації (УЗ/УФ/ЕМ). Новизна огляду полягає в інтегрованому зіставленні результатів різних досліджень за уніфікованими інженерними критеріями (ступінь вилучення Ni^{2+} , фазовий склад і магнітні властивості продуктів феритизації, їх екологічна безпечність, технологічність відокремлення та передумови масштабування технології) з виокремленням науково-практичних прогалин і пріоритетів подальших робіт.

ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ФЕРИТИЗАЦІЙНОГО МЕТОДУ

Традиційні підходи до очистки гальванічних стічних вод від іонів важких металів (гідроксидне осадження, адсорбція, мембранні процеси, електрохімія) характеризуються значними витратами реагентів і енергії, формуванням нестабільних осадів та технологічною складністю [1,2]. На цьому тлі феритизація має низку істотних переваг: високий ступінь вилучення Ni^{2+} у широкому діапазоні концентрацій; утворення хімічно стійких, малорозчинних феритів; можливість магнітної сепарації; потенціал використання осадів як технічної сировини [3–7].

Узагальнену візуалізацію традиційних методів вилучення важких металів та їх ключових характеристик наведено на рис. 1 [1].

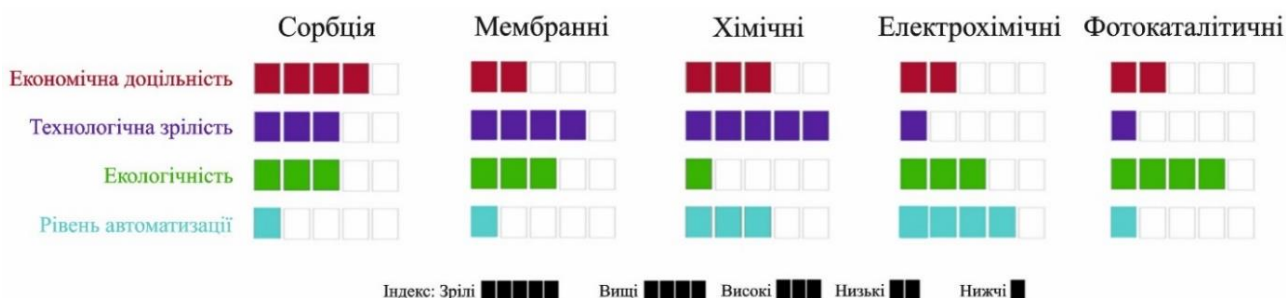


Рис. 1. Узагальнене порівняння типових методів очистки важких металів зі стічних вод [1]

Fig. 1. A general comparison between the typical methods used for heavy metals removal from wastewater [1]

Дослідження проведені українськими вченими в лабораторії “Технології переробки промислових відходів” КНУБА підтверджують ефективність застосування феритизації для вилучення іонів нікелю, міді, цинку та хрому з гальванічних стічних вод; що підтверджується опублікованими патентами [3,8] та узагальнено в монографії [9]. Слід зазначити, що у роботах за участю вчених КНУБА наведено приклади дослідно-промислового застосування, описано вплив електромагнітної обробки, а також можливість поєднання феритизації з ультразвуковою активацією реакційної суміші при переробці відпрацьованих травильних розчинів [8–11].

Сучасні дослідження зосереджені на впливі зовнішніх фізичних чинників на перебіг феритизації. Важливо віддати перевагу ефективній активації реакційної суміші замість традиційного енергоємного термічного підходу такими методами:

ультразвуковою, електромагнітно-імпульсною та ультрафіолетовою активацією. Ці підходи сприяють окисно-відновні реакції та кристалізацію феритних осадів, а також зменшують енерговитрати процесу [8, 10–14].

Як свідчать літературні дані, ефективність вилучення іонів нікелю значною мірою визначається умовами процесу. Ілюстративні морфологічні та структурні характеристики NiFe_2O_4 , синтезованого за даними Zhang et al. [13], наведено на рис. 2. Зображення, отримані методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM), демонструють агломерацію та зміни пористості частинок до й після адсорбційної реакції, а рентгенівська дифракція (XRD) підтверджує стабільність кубічної шпінельної структури. Ці дані використано ілюстративно як приклад властивостей феритів нікелю у споріднених системах.

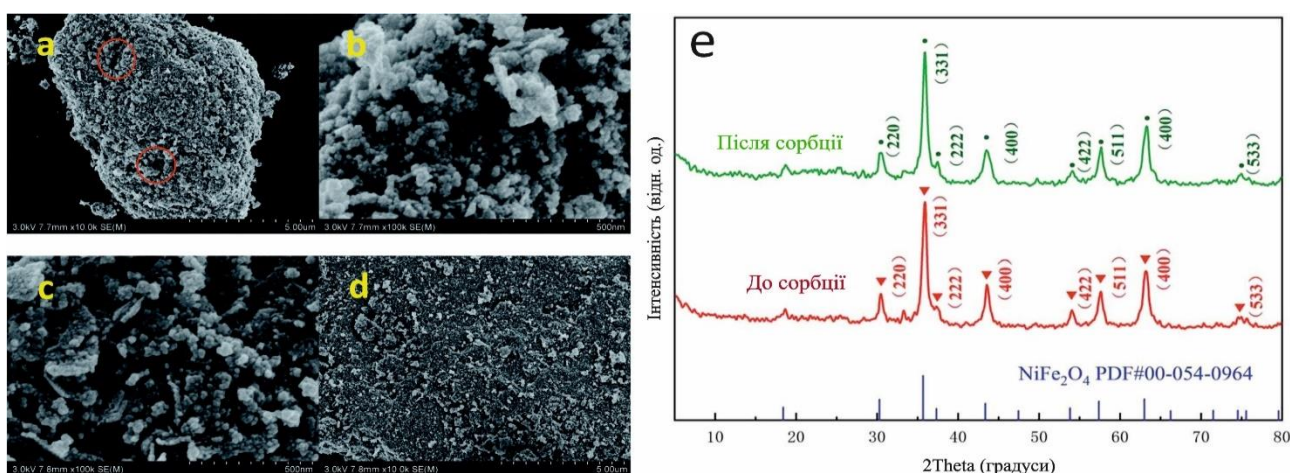


Рис. 2. SEM-зображення nano- NiFe_2O_4 до сорбції (a, b) та після сорбції (c, d); дифрактограми XRD nano- NiFe_2O_4 (e) [13]

Fig. 2. SEM images of nano- NiFe_2O_4 before the sorption (a, b) and after the sorption (c, d); XRD patterns of nano- NiFe_2O_4 (e) [13]

З наведених на рисунку даних видно зменшення пористості та ущільнення поверхні після реакції (SEM), а також зростання інтенсивності/звуження дифракційних піків (XRD), що узгоджується з укрупненням (агломерацією) зерен за збереження шпінельної фази NiFe_2O_4 .

У літературі наведені дані з дослідження впливу співвідношення іонів заліза та

нікелю, pH середовища, температури, тривалості обробки та інтенсивності аерації на ступінь очистки води та якість отриманих осадів [3,8–10].

- Співвідношення іонів заліза та нікелю. Для досягнення високого ступеня вилучення іонів нікелю рекомендується надлишок іонів заліза, що забезпечує формування змішаних феритів. Роботи

вітчизняних та іноземних авторів підтверджують, що співвідношення іонів заліза та нікелю є важливим для отримання стійких фаз, хоча конкретні значення варіюються в певних межах [3,8,9].

- рН середовища. Лужне середовище є необхідною умовою для утворення гідроксидів і подальшої феритизації. Публікації вказують, що оптимальний діапазон знаходиться у межах слабколужних значень 8,5–10,5, що забезпечують мінімальне використання лужного реагенту й стабільність феритів [8,9].
- Температура. Класична феритизація NiFe_2O_4 зазвичай потребує підвищених температур ($>75^\circ\text{C}$), що робить підігрів великих об'ємів енерговитратним: при $\Delta T \approx 40^\circ\text{C}$ теоретична теплота становить $\approx 46,5$ кВт·год на 1 м^3 води ($Q = m \cdot c \cdot \Delta T$; $m \approx 1000$ кг, $c \approx 4,186$ кДж·кг $^{-1}$ ·°C $^{-1}$). Це обґрунтовує застосування інтенсифікації реакцій, використовуючи ультразвук, ультрафіолет, електромагнітні впливи, що дозволяє проводити процес за температури навколишнього середовища або скоротити тривалість досягнення цільового вилучення без погіршення властивостей продукту; експериментальні дані [3, 8, 10] вказують, що саме температура визначає кінетику процесу та якість феритів. Додаткове зниження витрат можливе

за рахунок використання вторинних залізозовмісних ресурсів (відпрацьованих технологічних, зокрема травильних, розчинів) як часткового замітника реагентів за умови контролю домішок.

- Тривалість процесу. Час обробки впливає на завершеність окисно-відновних стадій і на формування кристалічної структури феритів. При занадто короткій тривалості процес неповний, тоді як надмірне подовження не забезпечує істотного підвищення ефективності (очищення) [8, 9].
- Аерація. Достатнє постачання кисню критично важливе для часткового окиснення іонів Fe^{2+} до Fe^{3+} , що є важливою стадією утворення феритів. Проведені дослідження, зокрема щодо очистки нікельовмісних і цинковмісних стічних вод, демонструють залежність ефективності процесу від інтенсивності аерації [8,10]. Перспективним вважаємо використання пероксиду водню як окисника реакційної суміші для утворення в осаді частинок з контрольованою морфологією та структурою.

Узагальнені дані щодо впливу ключових параметрів процесу феритизації (співвідношення іонів заліза та нікелю, рН, температура, тривалість та умови аерації) на ефективність вилучення іонів Ni^{2+} наведено в табл. 1.

Табл. 1. Узагальнені літературні дані щодо впливу параметрів процесу феритизації на ступінь очищення нікельовмісних розчинів.

Table 1. Summary of published data on the effect of ferritization process parameters on the purification efficiency of nickel-containing solutions.

Джерело	Fe/Ni	pH	T, °C	Час	Аерація	Ефективність Ni^{2+} , % (кінцева)
Qasem et al., 2021	1–5	8–11	25–90	30–240 хв	н/д	70–99
Wen et al., 2023	≈ 2	8.5	25–40	180 хв	н/д	80–88
Zatovskyi et al., 2014	2–3	8–9	60	60 хв	Примусова	90–95
Pakhomov et al., 2021	3–5	9–10	70	120 хв	Примусова	85–92
Puzanov et al., 2023	3–4	9	60	90 хв	Регульована	93–96
Peng et al., 2020	2–4	8–10	25	60 хв	н/д	75–85
Zhang et al., 2021	н/д	7	25	60 хв	н/д	н/д
Wang et al., 2022	н/д	≈ 7	25	30–60 хв	н/д	н/д

Як видно з табл. 1, ефективність вилучення іонів нікелю перевищує 90% за умов надлишку іонів заліза, – принаймні трьохкратного перевищення концентрації іонів заліза над іонами нікелю та лужного середовища (рН 8–10) при наявності аерації. Підвищена температура ($\approx 60^\circ\text{C}$) істотно прискорює процес, однак низка досліджень демонструє можливість досягнення високих результатів і при кімнатних температурах за умови зовнішньої альтернативної активації. Це підкреслює потенціал феритизації для очистки нікельвмісних стічних вод і визначає напрям подальших робіт, що будуть зосереджені на наступному.

- Ультразвукова активація. Кавітаційні процеси під дією ультразвуку створюють локальні підвищення тиску й температури, генерують активні радикали, посилюють масообмін та руйнують пасиваційні шари на частинках. Це прискорює окиснення іонів Fe^{2+} до Fe^{3+} і кристалізацію феритів [12]. Для нікельвмісних феритів та магнетитних сорбентів показано покращення магнітних властивостей та фазового складу; під час процесу очистки промивних стічних вод ліній цинкування описано позитивний ефект ультразвуку на активацію сорбентів [11]. У різних роботах відзначають, що конкретні режими й енергетичні показники суттєво варіюють [11,12].
- УФ-активація. УФ-випромінювання може ініціювати фотохімічне окиснення Fe^{2+} до Fe^{3+} та утворення гідроксильних радикалів $\bullet\text{OH}$, що покращує флокуляційні й коагуляційні властивості системи [13,14]. У літературі практично відсутні прямі приклади застосування УФ саме для феритизації нікельвмісних розчинів; більшість досліджень стосуються УФ-активації феррат-іонів Fe(VI) в процесі очистки води [14] або фотокаталітичних систем $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PMS}$ [13]. Це підкреслює доцільність подальших досліджень у цьому напрямку.
- Електромагнітно-імпульсна обробка. Роботи вчених КНУБА демонструють, що електромагнітна обробка може бути ефективним методом активації реакційної

суміші під час феритизаційної очистки нікельвмісних стічних вод, забезпечуючи стабільність і феромагнітні властивості отриманих осадів [8].

Таким чином, для частини досліджених систем (ультразвукові й ультрафіолетові впливи, а також УФ-активовані феритовмісні каталізатори з персульфатом) показано генерацію активних форм кисню та радикалів ($\bullet\text{OH}$, $\text{SO}_4\bullet^-$, $\text{O}\bullet$). Це явище може супроводжувати інтенсифікацію процесів окиснення й кристалізації. Водночас прямих експериментальних підтверджень утворення таких активних форм саме під час феритизації нікельвмісних гальванічних стічних вод наразі недостатньо; наведені літературні дані ілюстративні для суміжних моделей (рис. 3) [13].

ІНЖЕНЕРНІ АСПЕКТИ МАСШТАБУВАННЯ

Для подальшого впровадження розробленої технології переробки нікельвмісних стічних вод доцільне масштабування процесу. Можлива його реалізація у каскаді реакторів безперервного перемішування (РБП) зі ступеневою аерацією: швидке змішування стічних вод із розчином іонів Fe^{2+} за контрольованих значень рН та окисно-відновного потенціалу (ОВП) і заданого співвідношення іонів заліза та нікелю; кероване окиснення іонів Fe^{2+} до Fe^{3+} повітрям і/або фотохімічно – за рахунок УФ-активованих перетворень залізовмісних видів та, за потреби, УФ-активації окисника; дозрівання/кристалізація феритів і відокремлення твердої фази [3,6,14]. Для енергоощадного інтенсивного змішування на вході першої стадії застосовують статичні міксери; для виділення продукту – магнітну сепарацію (високоградієнтні магнітні системи) або гравітаційне ущільнення з магнітним відбором і рециркуляцією феритної фракції назад у першу стадію [3,7]. Режими аерації є критичними для якості феритної фази й швидкості процесу; їх підбирають з урахуванням чутливості до подачі кисню та складу середовища [3,10]. Доцільно забезпечити онлайн-контроль рН та ОВП (за можливості – і розчиненого кисню), узго-

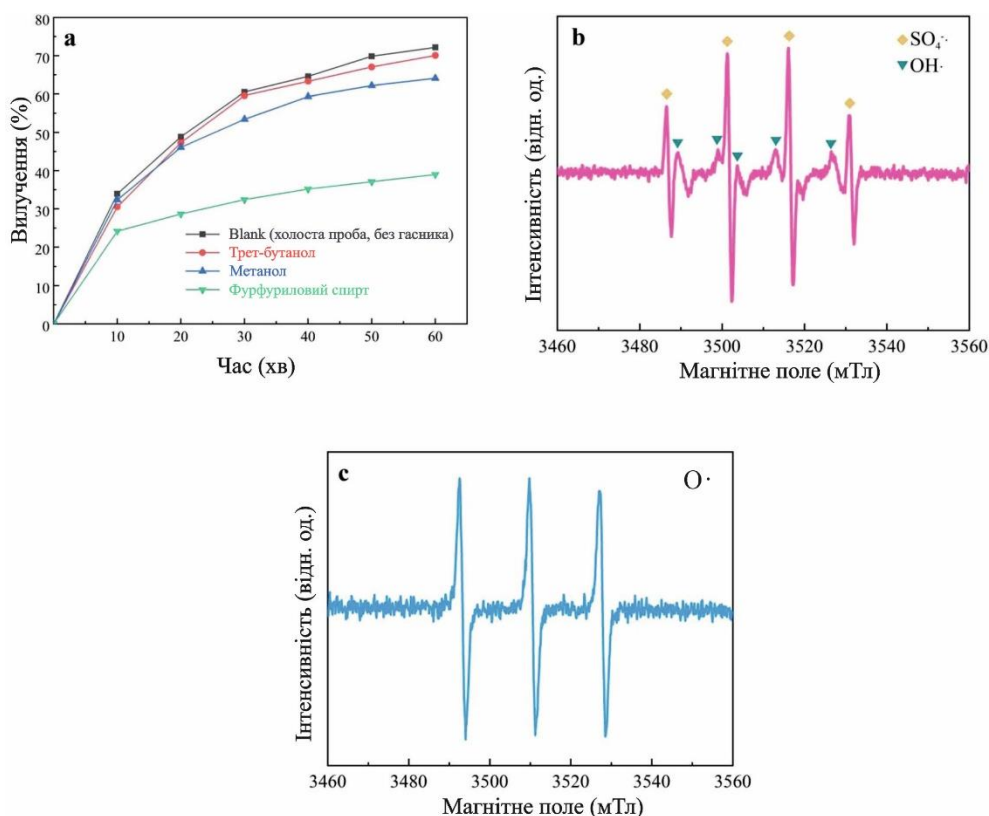


Рис. 3. Ідентифікація радикалів за допомогою різних гасників (а); ЕПР-спектри $\bullet\text{OH}$, $\text{SO}_4^{\bullet-}$ (b) та синглетного кисню $\text{O}^{\bullet}$ (c), утворених через 60 хв у системі UV + nano- $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PMS}$; умови: $[\text{nano-NiFe}_2\text{O}_4] = 1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, $[\text{CTH}] = 60 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, $[\text{PMS}] = 1 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, довжина хвилі UV = 254 нм, pH = 2,7 [13].

Fig. 3. Identification of radicals by different quenching agents (a); EPR spectra of $\bullet\text{OH}$, $\text{SO}_4^{\bullet-}$ (b) and $\text{O}^{\bullet}$ (c) formed after 60 min in the UV + nano- $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PMS}$ system; the above experimental condition: $[\text{nano-NiFe}_2\text{O}_4] = 1 \text{ g L}^{-1}$, $[\text{CTH}] = 60 \text{ mg L}^{-1}$, $[\text{PMS}] = 1 \text{ g L}^{-1}$, [UV wavelength] = 254 nm, pH = 2.7 [13].

дити дозування залізовмісних реагентів ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) зі стартовою концентрацією іонів нікелю та уникати надмірного окиснення реакційної суміші, що призводить до утворення $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [3]. Зовнішні фізичні впливи застосовують з метою: ультразвук для прискорення гідролізу/кристалізації та модифікації феритних властивостей; УФ – для інтенсифікації перетворень заліза та взаємодій із NiFe_2O_4 -каталітично активними системами; ЕМ-обробка — для покращення перебігу феритизації у відповідних режимах [11,12,6,13, 8,9]. Вибір конкретних параметрів узгоджують із хімічним складом стічних вод (у тому числі за наявності комплексують іонів нікелю), що демонструють приклади відновлення NiFe_2O_4 з розчинів нікель-цитрату [4]. Проведений аналіз підтверджує доцільність феритизації для

вилучення іонів нікелю та актуальність дослідження методів її інтенсифікації.

Перспективи подальших робіт передбачають: уніфікацію режимів використання УЗ, УФ, ЕМ залежно від хімічного складу феритизаційної суміші; пілотні випробування з повним енергетичним і матеріальним балансами процесу; обов'язкові випробування на стабільність і вилуговування продуктів феритизації перед їх утилізацією або ресурсним використанням; опрацювання схем реакторів, аерації та магнітної/гідравлічної сепарації феритного осаду.

ВИСНОВКИ

Огляд літератури підтверджує, що феритизація є ефективним методом для вилучення іонів Ni^{2+} із гальванічних стічних вод завдяки формуванню малорозчинних

шпінельних фаз (NiFe_2O_4), які спрощують відокремлення твердої фази на магнітних фільтрах та знижують екологічні ризики вилуговування отриманих осадів. Порівняно з традиційними методами феритизація демонструє кращу стабілізацію токсичних сполук нікелю та підвищує потенціал подальшого їх використання.

Ефективність процесу визначається керуваними параметрами – співвідношенням іонів заліза та нікелю, рН, температурою, тривалістю контакту та використанням окисників. Ключовий технологічний недолік феритизації – температура процесу більше ніж 60°C . Це підвищує енерговитрати й ускладнює масштабування процесу. Зовнішні фізичні впливи (ультразвукова, ультрафіолетова та електромагнітна активація) здатні прискорювати стадії гідролізу/кристалізації й підвищувати ступінь вилучення, тим самим зменшуючи час/температуру процесу.

Водночас технологія має обмеження та ризики: необхідна перевірка стабільності продуктів феритизації; наявність органічних домішок, які підвищують потребу в дозуванні іонів феруму та можуть змінювати фазовий склад утворених осадів; ризик переокиснення іонів Fe^{2+} за недостатнім контролем аерації і рН. Це призводить до формування неферомагнітних фаз, які нестабільні і погано відокремлюються від рідкої фази.

При постановці та проведенні подальших експериментальних та теоретичних досліджень з переробки нікельовмісних технологічних розчинів та стічних вод будуть використані викладені вище і критично оцінені літературні дані.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Qasem N. A. A., Mohammed R. H., Lawal D.U.** Removal of heavy metal ions from wastewater: a review // *npj Clean Water*, 2021, 4, 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
2. **Duque L., Gutierrez L., Menendez N., Herrasti P., Mazario E.** Novel, simple, and environmentally safe method for wastewater pollutant removal // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 42, 102181. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102181>
3. **Кочетов Г. М., Самченко Д. М.** Ресурсоощадна феритизаційна переробка гальванічних відходів. Київ: КНУБА. 2020, 150 с.
4. **Wen D., You Z., Tian K., Wang Z.** Recovery of NiFe_2O_4 from wastewater containing nickel citrate complexes and its application to active peroxy-monosulfate // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(2), 109422. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109422>
5. **Arumugham N., Mariappan A., Eswaran J., Daniel S., Kanthapazham R., Kathirvel P.** Nickel ferrite-based composites and its photocatalytic applications: a review // *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2022, 8, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100156>
6. **Wang J., Liu Y., Feng L., Wang Y., Jia H.** New insights on UV-activated transformation of polynuclear Fe-hydroxide and iron(III) (hydr)oxide for enhanced removal of natural organic matter by ferrate // *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49, 103183. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103183>
7. **Kaur M., Kaur N. (2016).** Ferrites: Synthesis and Applications for Environmental Remediation // *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*, 113–136. <https://doi.org/10.1021/bk-2016-1238.ch004>
8. **Затовський І. В., Кочетов Г. М., Самченко Д. М., Тугай А. М.** Очистка стічних вод, які містять нікель, феритизацією: вплив електромагнітної обробки // *Комунальне господарство міст*, 2014, 114, 114–117. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/4484/4453>
9. **Пахомов Д., Кочетов Г. М., Самченко Д. М.** Феритизація стічних вод від сполук хрому(VI) із застосуванням електромагнітної імпульсної активації // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2021, №37, 65–73. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.65-73>
10. **Пузанов А., Самченко Д., Кочетов Г., Соседко А., Ємчура Б.** Дослідження очистки промивних стічних вод від іонів цинку магнітними сорбентами: вплив швидкості аерації // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2023, Вип. 43, С. 64–76. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.64-73>
11. **Соседко А., Пузанов А., Кочетов Г.** Розробка комплексної очистки стічних вод лінії цинкування гальванічних виробництв (ультразвук і магнетит) // Програма і тези доповідей конференції “Екологія. Ресурси. Енергія”, КНУБА, Київ, 2024, С. 30.

12. Peng Y., Xia C., Cui M., Yao Z., Yi X. Effect of reaction condition on microstructure and properties of (NiCuZn)Fe₂O₄ nanoparticles synthesized via co-precipitation with ultrasonic irradiation // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71, 105369. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105369>
13. Zhang L., Zhang R., Wang W., Han S., Xiao, P. UV-enhanced nano-nickel ferrite-activated peroxymonosulfate for the degradation of chlortetracycline hydrochloride in aqueous solution // *RSC Advances*, 2021, 11(33), 20580–20590. <https://doi.org/10.1039/d1ra02358f>
14. Wang Y., Luo X., Ma X., Kemacheevakul P., Qu S., Huang J., Chea T. G., Sun P., Zhao L., Zhang Y., Yang Y. The Effect and Adjustment of Ferrate Species in Ferrate-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: A Systematic Review // *Water*, 2025, 17(9), 1343. <https://doi.org/10.3390/w17091343>

REFERENCES

1. Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a review. *npj Clean Water*, 4, 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
2. Duque, L., Gutierrez, L., Menendez, N., Herrasti, P., & Mazario, E. (2021). Novel, simple, and environmentally safe method for wastewater pollutant removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 42, 102181. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102181>
3. Kochetov, G. M., & Samchenko, D. M. (2020). Resursooshchadna ferytyzatsiina pererobka halvanichnykh vidkhodiv [Resource-saving ferritization processing of galvanic wastes]. Kyiv: KNUBA. 150 p. [in Ukrainian]
4. Wen, D., You, Z., Tian, K., & Wang, Z. (2023). Recovery of NiFe₂O₄ from wastewater containing nickel citrate complexes and its application to active peroxymonosulfate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109422. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109422>
5. Arumugham, N., Mariappan, A., Eswaran, J., Daniel, S., Kanthapazham, R., & Kathirvel, P. (2022). Nickel ferrite-based composites and its photocatalytic applications: a review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100156>
6. Wang, J., Liu, Y., Feng, L., Wang, Y., & Jia, H. (2022). New insights on UV-activated transformation of polynuclear Fe-hydroxide and iron(III) (hydr)oxide for enhanced removal of natural organic matter by ferrate. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103183. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103183>
7. Kaur, M., & Kaur, N. (2016). Ferrites: Synthesis and Applications for Environmental Remediation. *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*, 113–136. <https://doi.org/10.1021/bk-2016-1238.ch004>
8. Zatovskyi, I. V., Kochetov, H. M., Samchenko, D. M., & Tuhai, A. M. (2014). Ochyshchennia stichnykh vod, yaki mistiat nikel, ferytyzatsiieiu: vplyv elektromahnitnoi obrobky [Treatment of nickel-containing wastewater by ferritization: influence of electromagnetic treatment]. *Komunalne hospodarstvo mist [Municipal Economy of Cities]*, 114, 114–117. Retrieved from <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/4484/4453> [in Ukrainian]
9. Pakhomov, D., Kochetov, G., & Samchenko, D. (2021). Ferritative wastewater treatment from chromium (VI) compounds using electromagnetic pulse activation. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (37), 65–73. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.65-73>
10. Puzanov, A., Samchenko, D., Kochetov, H.M., Sosedko, A., & Yemchura, B. (2023). Study on the treatment of rinse wastewater containing zinc ions using magnetic sorbents: influence of aeration rates. *Problems of Water Supply, Drainage and Hydraulics*, (43), 64–76. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.64-73>
11. Sosedko, A., Puzanov, A., & Kochetov, G. (2024). Development of integrated wastewater treatment for galvanic zinc-plating lines (ultrasound and magnetite). *Conference abstracts "Ecology. Resources. Energy"*, KNUBA, Kyiv. [in Ukrainian]
12. Peng, Y., Xia, C., Cui, M., Yao, Z., & Yi, X. (2021). Effect of reaction condition on microstructure and properties of (NiCuZn)Fe₂O₄ nanoparticles synthesized via co-precipitation with ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 71, 105369. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105369>
13. Zhang, L., Zhang, R., Wang, W., Han, S., & Xiao, P. (2021). UV-enhanced nano-nickel ferrite-activated peroxymonosulfate for the degradation of chlortetracycline hydrochloride in aqueous solution. *RSC Advances*, 11(33), 20580–20590. <https://doi.org/10.1039/d1ra02358f>
14. Wang, Y., Luo, X., Ma, X., Kemacheevakul, P., Qu, S., Huang, J., Chea, T. G., Sun, P., Zhao, L., Zhang, Y., & Yang, Y. (2025). The Effect and Adjustment of Ferrate Species in Ferrate-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: A Systematic Review. *Water*, 17(9), 1343. <https://doi.org/10.3390/w17091343>

Ferritization of nickel-bearing galvanic wastewater: process parameters, activation methods, and scale-up considerations

Mykhailo Fortunenko, Gennadii Kochetov

Abstract. Electroplating facilities generate large volumes of wastewater with elevated contents of nickel ions (Ni^{2+}), characterized by toxicity, bioaccumulation, and persistence in aquatic environments. This creates a need for technologies capable not only of effectively reducing the pollutant concentration, but also of converting it into a chemically stable solid phase with low leachability. Traditional methods (hydroxide precipitation, ion exchange, membrane, and electrochemical processes) often require significant reagent and energy inputs and generate unstable sludge that is sensitive to fluctuations in wastewater composition. Against this background, ferritization – the targeted formation of spinel ferrites NiFe_2O_4 involving iron compounds – is a promising approach that combines a high degree of Ni^{2+} removal, the formation of a low-solubility ferromagnetic phase, and simplified separation (magnetic separation/thickening). Data are systematized on the influence of key parameters (the ratio of iron to nickel ions, pH level, temperature, contact time, aeration/oxidants) on process efficiency and on the properties of ferritization products (ferrite sludge); information is summarized on external physical influences that intensify the process (ultrasound, ultraviolet, electromagnetic treatment). It is shown that “classical” ferritization often requires elevated temperatures (typically $>60\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$), whereas the application of intensification methods can potentially reduce energy consumption and shorten the time to achieve the target purification degree without loss of product stability. Particular attention is paid to engineering principles of scale-up (a cascade of continuous stirred-tank reactors, CSTR; static mixers; control of pH and oxidation–reduction potential, ORP; aeration regime; integrated magnetic separation) and to issues of the long-term environmental safety of sludge. As a result of a critical analysis of sources, scientific–practical gaps were identified, namely: the unification of technological treatment regimen for different types of wastewater, verification of energy balances at the pilot scale, and assessment of the leaching of ferritization products prior to disposal or resource use.

Keywords: electroplating industry, industrial wastewater, nickel ions, ferritization, activation methods.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025