

ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ СУЛЬФАТУМІСНИХ СТОКІВ ВІД ІОНІВ ЗАЛІЗА МАГНІТОСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ

Сергій Довголап

аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, s.dovholap@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2456-2249

В'ячеслав Радовенчик

доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, dokeco@ukr.net

ORCID: 0000-0001-5361-5808

Олена Отрох

провідний інженер кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, otrox2204@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1570-5558

Олена Іваненко

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, olenka.vasaynovich@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6838-5400

Тетяна Оверченко

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, overchenko.tanya@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5883-6228

Відомо, що одним із найбільших забруднювачів водного середовища є підприємства, пов'язані з металообробними галузями, зокрема гальванічними виробництвами. Значну кількість відходів гальванічних виробництв становлять травильні розчини, обсяги яких сягають 0,1 м³/т сталі. Відзначено, що щорічне скидання в поверхневі водні об'єкти України іонів заліза в складі неочищених і недостатньо очищених стічних вод у середньому становить 414 т. Показано, що в разі надходження до басейнів річок залізовмісних стоків, зокрема, після процесів травлення підвищується кольоровість природних вод, що особливо характерно для водосховищ Дніпровського каскаду на території України. Відповідно, ці факти вимагають термінового застосування методів запобігання забрудненню довкілля шляхом очищення залізовмісних стічних вод. Наведено результати досліджень щодо вилучення іонів заліза із сульфатумісних розчинів за допомогою магнітосорбційного методу. Магнітосорбційний метод полягає в проходженні процесу сорбції забруднень у водних середовищах із застосуванням високодисперсних сорбентів із магнітними властивостями, що отримували шляхом осадження із суміші розчинів сульфатів заліза (II) і заліза (III). Установлено, що з водних розчинів краще сорбуються гідролізовані форми іонів заліза (III), причому ефективність вилучення іонів Fe³⁺ зростає з підвищенням рН, а максимальна ефективність процесу відповідає рН повного гідролізу іонів Fe³⁺. Показано, що процес сорбції гідролізованих форм заліза (III) часточками синтетичного магнетиту відбувається повною мірою за тривалості контакту часток магнетиту з розчином протягом 2 хв. З'ясовано, що в кислих розчинах зі збільшенням [Fe²⁺]:[Fe³⁺] ефективність видалення іонів заліза знижується, так як із підвищенням співвідношення іонів заліза дефектність структури зростає, а при рН≤3 магнетит починає розчинятися. Обґрунтовано, що найдоцільніше для проведення магнітосорбційного очищення використовувати магнетит з [Fe²⁺]/[Fe³⁺]=0,5. Запропоновано технологічну схему очищення води від іонів заліза з багаторазовим використанням частинки магнетиту й забезпеченням граничних норм на скид очищеної води в каналізаційну мережу.

Ключові слова: очищення, магнетит, залізусульфатумісні розчини, ферит, гідроліз, сорбція, магнітосорбційний метод.

Актуальність роботи. У результаті антропогенної діяльності людини з кожним роком спостерігається інтенсивне забруднення поверхневих і підземних вод, що скорочує кількість придатної для споживання води. Сьогодні більшість водойм на території України характеризуються як забруднені та брудні (III і IV клас якості) [1]. В окремих регіонах України, включаючи басейни Дніпра, Сіверського Дінця, річок Приазов'я, вода класифікується як «дуже брудна» (V клас якості).

Одним із найбільших забруднювачів водного середовища є підприємства, пов'язані з металобробними галузями, зокрема гальванічними виробництвами. Значну кількість відходів гальванічних виробництв становлять травильні розчини, обсяги яких сягають $0,1 \text{ м}^3/\text{т}$ сталі [2]. Залізосульфатумісні травильні стоки можуть мати мінливу концентрацію солей на рівні $100\text{--}300 \text{ г/дм}^3$ [3]. Згідно зі статистичними даними [4], щорічне скидання в поверхневі водні об'єкти України іонів заліза в складі неочищених і недостатньо очищених стічних вод у середньому становить 414 т.

У разі надходження до басейнів річок залізовмісних стоків, зокрема, після процесів травлення підвищується кольоровість природних вод, що особливо характерно для водосховищ Дніпровського каскаду на території України [5]. Окрім того, у результаті здійснення моніторингу стану транскордонних річок у рамках двосторонніх угод [6] зафіксовано недопустиме перевищення вмісту іонів заліза. Усі ці факти вимагають термінового застосування методів запобігання забрудненню довкілля шляхом очищення залізовмісних стічних вод.

Для переробки таких розчинів найчастіше застосовують реагентний метод [7], однак він не завжди гарантує високу якість очищення від іонів заліза в маточному розчині та супроводжується утворенням значного об'єму шламів високої вологості, які складно утилізувати. Суттєві переваги порівняно з реагентним методом очищення стічних вод гальванічного виробництва від іонів заліза має сорбційний метод [8]. Зокрема, використання таких сорбентів, як активоване вугілля та цеоліти, дає змогу досягти практично нульових залишкових концентрацій важких металів в очищеній воді [9]. Проте залишається не повністю вирішеною проблема утилізації відпрацьованих сорбентів, особливо в разі використання активованого вугілля як поглинача важких металів. Новітнім методом очищення стічних вод від іонів заліза є фільтрування з використанням капіляр-

них матеріалів [10]. Проте його застосування можливе тільки для вилучення домішок із низькоконцентрованих розчинів на рівні забруднення природних вод, що не притаманне стічним водам гальванічного виробництва.

Тому останнім часом усе частіше практикується переробка цих розчинів так званим феритним методом з отриманням суспензії вискокодисперсних часток із магнітними властивостями – магнетиту [7]. Одним із напрямів використання магнетиту є сорбція різноманітних забруднень у водних середовищах, тобто застосування магнітосорбційного методу.

Більшість промивних стічних вод гальванічного виробництва мають вищу за граничні норми концентрацію сполук заліза, що становить $2,5 \text{ мг/дм}^3$. Розчини зі сполуками заліза (III) просто нейтралізують, у результаті чого в осад випадає $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Сполуки заліза (II) окислюють до заліза (III), а потім воду нейтралізують лужними реагентами. В обох випадках залежно від конкретних умов необхідно тривале відстоювання води для відділення осаду, а залишкові концентрації іонів заліза, особливо в разі $\text{Fe}(\text{OH})_2$, можуть сягати вище за 10 мг/дм^3 , що перевищує граничні норми [7].

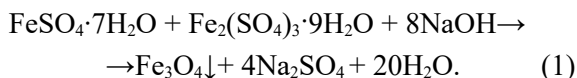
Ефективним у такій ситуації може бути використання для доочистки води високодисперсних частинок із магнітними властивостями. Ці частинки не збільшують умісту солей у воді, що обробляється. Вони можуть бути відділені від води за допомогою магнітного поля, що дає змогу значно скоротити тривалість технологічного циклу й уникнути використання високооб'ємних споруд – відстійників. Відпрацьовані сорбенти можна використовувати як сировину для виготовлення пігментів, фарб, феритів, завдяки чому з'являється можливість упровадження безпечної з екологічного погляду технології [7].

Про можливість сорбції сполук заліза частинками магнетиту відомо, однак це питання вивчено недостатньо в разі використання магнетиту, утвореного із сульфатів заліза (II) та (III).

Метою роботи було встановлення оптимальних умов видалення з модельних розчинів сполук заліза за допомогою високодисперсних частинок магнетиту, отриманих із залізосульфатумісного розчину.

Матеріал і результати досліджень. Методика експерименту складалася з приготування імітаційного водного розчину FeSO_4 чи $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ та обробки його суспензією магнетиту в різних умовах.

У роботі частинки магнетиту отримано шляхом осадження із суміші розчинів солей заліза (II) й заліза (III), наявність магнітних властивостей визначали за методикою [11]. Методика проведення експерименту передбачала приготування водного розчину $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ й $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ з концентрацією солей заліза, відповідно, 27,8 і 56,2 г/дм³, що відповідає стехіометричному відношенню $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{Fe}^{3+}]=1:2$ у складі природного магнетиту. Процес осадження при рН=9,0–9,5 за допомогою NaOH описується рівнянням:



Надалі суспензію відмивали від солей способом декантації до нейтральної реакції та зберігали під шаром дистильованої води. Після обробки суспензією магнетиту модельні розчини пропускали через електромагнітний фільтр, а фільтрат аналізували за методикою [12] на наявність сполук заліза. В експериментах використовували хімічні реагенти кваліфікації ХЧ. Паралельно проводили 4–6 дослідів. Повторюваність експериментів була задовільною.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

Модельний розчин солі заліза заливали в склянку, додавали необхідну кількість часточок магнетиту й за допомогою NaOH чи H_2SO_4 встановлювали необхідне значення водневого показника. Після перемішування протягом визначеного часу суміш фільтрували через електромагнітний фільтр у вигляді соленоїда, робочий об'єм

якого заповнений частками фериту розміром 1,5–2,0 мм. За допомогою джерела постійного струму в робочому об'ємі фільтра створювалося магнітне поле напруженістю 130 кА/м. Під час фільтрування суспензії магнетиту через такий фільтр феромагнітні часточки надійно фіксувалися в його порах, а відібрані проби фільтрату аналізували на вміст сполук заліза. Періодично фільтр через патрубки промивали дистильованою водою при вимкненому джерелі живлення.

Стан іонів дво- і тривалентного заліза значною мірі залежить від рН, тому на першому етапі вивчено вплив водневого показника на ефективність видалення іонів заліза частками магнетиту (рис. 2). Оскільки нас цікавили передусім оптимальні технологічні параметри реального процесу очищення, то модельні розчини не ізолювали від повітря. Це впливало на результати експериментів в разі Fe^{2+} , про що буде сказано нижче.

Найкраще сорбуються гідролізовані форми іонів заліза (III). Іони Fe^{3+} починають і закінчують гідролізуватися в розбавлених розчинах при рН 1,5 і 4,5 відповідно [7]. Для іонів Fe^{2+} ці процеси відбуваються при рН 6,5 і 9,5 відповідно. Таким чином, ефективність вилучення іонів Fe^{3+} зростає з підвищенням рН (крива 1), а максимальна ефективність процесу відповідає рН повного гідролізу іонів Fe^{3+} . У разі додавання в модельний розчин іонів Fe^{2+} хід кривої змінюється (крива 2). У діапазоні рН 4,0–5,5 на графіку з'являється плато, після якого підвищення ефективності видалення сполук заліза продовжується. На нашу думку, у діапазоні рН 2–4 підвищення ефективності про-

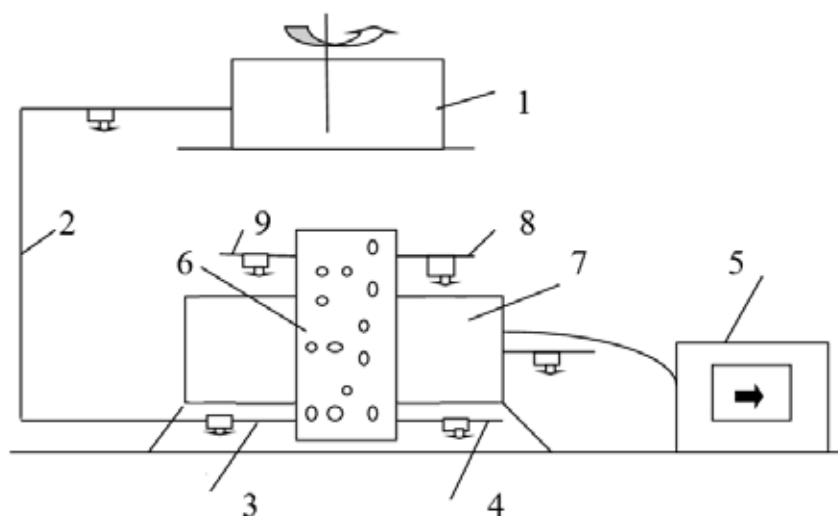


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – склянка з мішалкою; 2 – трубопровід для подачі стічної води; 3 – вхідний патрубок; 4, 8 – промивні патрубки; 5 – блок живлення; 6 – феромагнітна насадка; 7 – намагнічувальна система; 9 – патрубок для зливу фільтрату

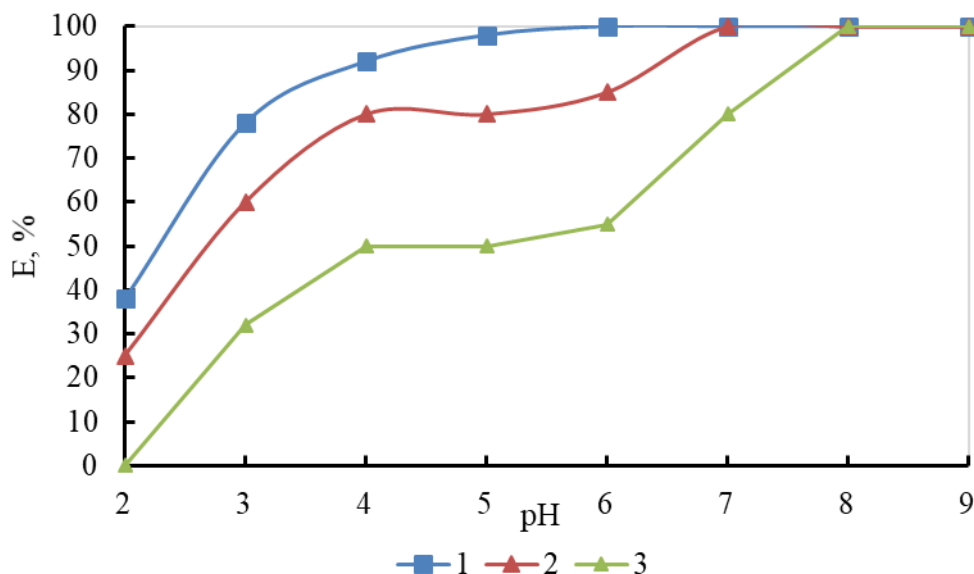


Рис. 2. Залежність ефективності видалення іонів заліза від рН ($C_{\text{магн}}=150$ мг/дм³, $t=25^{\circ}\text{C}$, $\tau=5$ хв):
 1 – $[\text{Fe}^{3+}]=20$ мг/дм³; 2 – $[\text{Fe}^{2+}]=10$ мг/дм³ + $[\text{Fe}^{3+}]=10$ мг/дм³; 3 – $[\text{Fe}^{2+}]=20$ мг/дм³

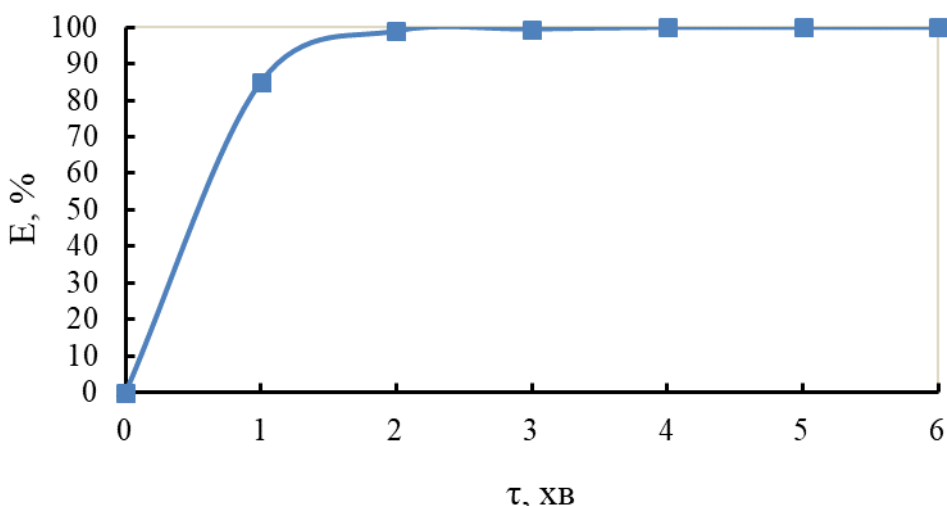


Рис. 3. Залежність ефективності видалення іонів заліза від тривалості контакту часток магнетиту з розчином (рН=8, $t=25^{\circ}\text{C}$, $C_{\text{Fe}^{3+}}=20$ мг/дм³, $C_{\text{магн}}=150$ мг/дм³)

цесу зумовлено гідролізом Fe^{3+} , підвищення після плато – гідролізом Fe^{2+} . Очевидно, уже в процесі приготування розчинів частина Fe^{2+} окислюється киснем повітря, розчиненим у воді. Тому й у цьому випадку крива матиме дві характерні випуклості (крива 3), які збігаються з рН повного гідролізу Fe^{3+} і Fe^{2+} відповідно. З підвищенням рН швидкість окислення Fe^{2+} також зростає, що не може не вплинути на загальну ефективність процесу.

Процес сорбції гідролізованих форм заліза (III) частками синтетичного магнетиту відбувається досить інтенсивно (рис. 3), протягом пер-

ших двох хвилин він повністю завершується, подальше збільшення тривалості контакту часток магнетиту з модельним розчином не супроводжується відповідним підвищенням ефективності вилучення сполук заліза.

Автори дослідили кілька зразків суспензії магнетиту з різним співвідношенням концентрацій Fe^{2+} і Fe^{3+} у часточках магнетиту ($K=[\text{Fe}^{2+}]/[\text{Fe}^{3+}]$). У межах $K=0,2-2,2$ часточки магнетиту, отримані з сульфатумісних стоків, так як із сульфатхлоридумісних [11], зберігають магнітні властивості, достатні для видалення їх із водного середовища магнітним полем. У цьому діа-

пазоні зміна K суттєво не впливає на необхідну тривалість контакту часточок з водою, що обробляється. Очевидно, що для умов цього експерименту достатньо 5 хв перемішування суміші суспензії магнетиту з модельним розчином. У реальних виробничих умовах цю величину необхідно встановлювати експериментально, оскільки вона залежить від великої кількості факторів (об'єму змішувача, швидкості води, концентрації суспензії магнетиту).

Під час дослідження різних зразків магнетиту встановлено, що в кислих розчинах зі збільшенням K ефективність видалення іонів заліза знижується (рис. 4). У нейтральних і лужних розчинах такої залежності не спостерігається. На нашу думку, це може бути зумовлено процесами десорбції надлишкових іонів та усунення дефектів кристалічної ґратки частинок магнетиту. З підвищенням K дефектність структури зростає, а при $pH \leq 3$ магнетит починає розчинятися.

Тому, зважаючи на максимальні магнітні властивості, у процесах видалення іонів заліза з водних розчинів найдоцільніше використовувати магнітні частки з $K=0,5$, оскільки при інших K суттєвого збільшення ефективності процесу не відбувається.

У діапазоні температур $10-70^\circ C$ суттєвих змін ефективності процесу не спостерігається. Це твердження справедливе для зразків магнетиту з $K=0,2-2,2$.

На основі проведених дослідження для видалення сполук заліза з водних розчинів при концентраціях $10-100 \text{ мг/дм}^3$ можна рекомендувати технологічну схему, наведену на рис. 5. До початку процесу очищення води треба підготувати суспензію магнетиту. Для цього застосовують відпрацьовані сульфатумісні електроліти травлення сталі чи інші сульфатумісні розчини, які містять значну кількість іонів заліза (II) та (III). Одержання магнетиту передбачає доведення в початковому розчині $K=[Fe^{2+}]/[Fe^{3+}]$ до $0,5$, установа за допомогою розчинів лугу $pH=9,0-9,5$ і відмивання суспензії від сульфатів (за необхідності).

Стічну воду, що містить $10-100 \text{ мг/дм}^3$ іонів заліза, подають у змішувач, куди водночас додають $100-1000 \text{ мг/дм}^3$ суспензії магнетиту й розчин лугу для доведення pH до $8-9$. Після перемішування протягом $10-20$ хв суміш подають на магнітні фільтри грубої й тонкої очистки, де відділяються частки магнетиту із сорбованими сполуками заліза від очищеної води. Очищена вода скидається в каналізаційну систему або повторно використовується в технологічному процесі. Відділений шлам подається на складування чи для подальшої обробки (прокалювання та використання його як пігменту). За відсутності відпрацьованих розчинів травлення сталі суспензію магнетиту можна використовувати багаторазово.

Для цього в реактор додають розчин, який містить Fe^{2+} (половину сумарної кількості сорбова-

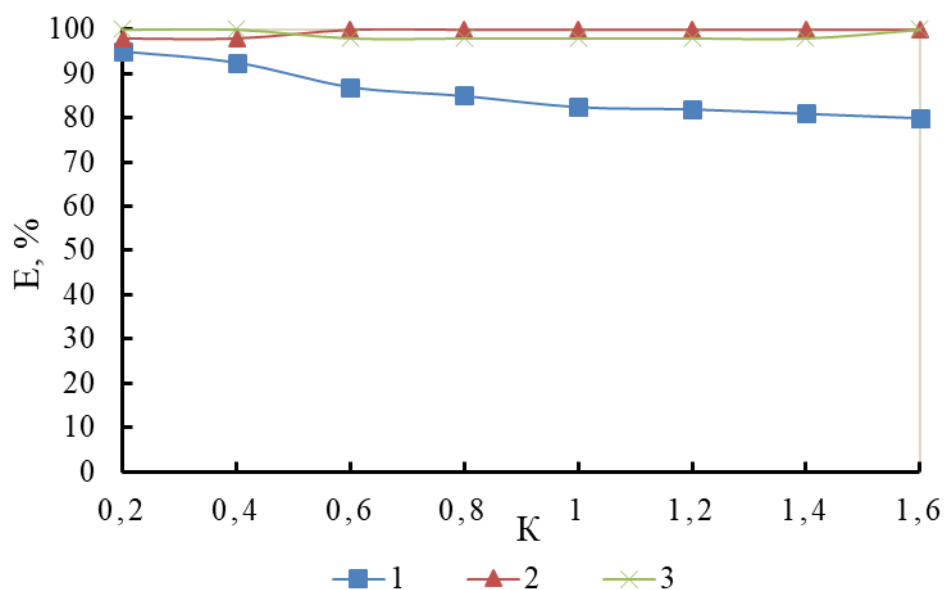


Рис. 4. Залежність ефективності видалення іонів заліза від K при різних pH ($t=25^\circ C$, $C_{Fe^{3+}}=20 \text{ мг/дм}^3$, $C_{магн}=150 \text{ мг/дм}^3$): 1 – $pH=3$, 2 – $pH=7$, 3 – $pH=10$

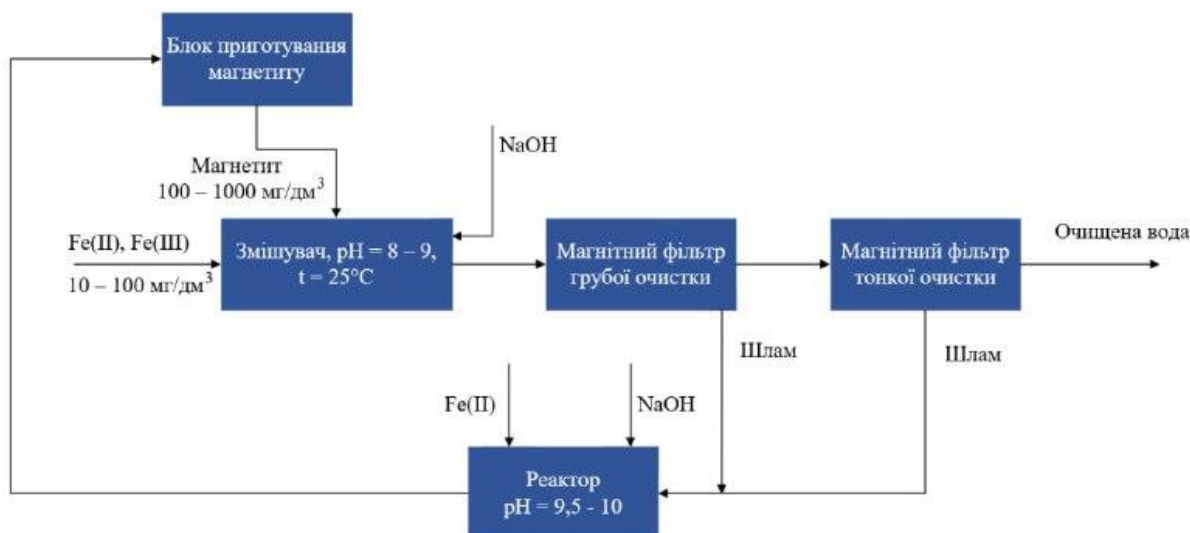


Рис. 5. Технологічна схема видалення іонів заліза з водних розчинів

них іонів), і розчин NaOH до pH=9,5–10. За такої обробки основні властивості часток магнетиту (магнітні й сорбційні) відновлюються, суспензія подається в блок приготування магнетиту.

Під час обробки води за наведеною схемою залишкові концентрації іонів заліза не перевищують граничну норму на скид у каналізаційну систему.

Висновки. У результаті проведених досліджень вилучення іонів заліза з використанням високодисперсних сорбентів із магнітними властивостями встановлено, що із сульфатумісних розчинів краще сорбуються гідролізовані форми іонів заліза (III). При цьому ефективність вилучення іонів Fe³⁺ зростає з підвищенням pH, а максимальна ефективність процесу відповідає pH повного гідролізу іонів Fe³⁺. Проходження процесу сорбції гідролізованих форм заліза (III) часточками синтетичного магнетиту відбувається повною мірою за тривалості контакту часток магнетиту з розчином протягом 2 хв. У кислих розчинах зі збільшенням [Fe²⁺]:[Fe³⁺] ефективність видалення іонів заліза знижується, так як із підвищенням співвідношення іонів заліза дефектність структури зростає, а при pH≤3 магнетит починає розчинятися. Як показали дослідження, найдоцільніше в разі застосування магнітосорбційного методу використовувати магнетит із [Fe²⁺]:[Fe³⁺]=0,5. Отже, з огляду на встановлені оптимальні умови видалення іонів заліза, запропонована технологічна схема очищення води від іонів заліза з багаторазовим використанням часточок магнетиту забезпечує граничні норми на скид очищеної води в каналізаційну мережу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпенко М.В., Радовенчик Я.В., Іваненко О.І. Видалення сполук заліза із механічних фільтрів побутових зворотноосмотичних систем очищення води. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 2. С. 127–132. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2023.279720.
2. Фролова Л.А. Використання відпрацьованих травильних розчинів для виробництва жовтих залізооксидних пігментів. *Modern problems of Metallurgy*. 2018. № 21 (1). С. 82–86. DOI: 10.34185/1991-7848.2018.01.013. <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/mpm/article/download/137/63/313>.
3. Technoecology: Textbook / О.І. Іваненко, Ю.В. Носачова, В.О. Овсіанкіна, В.В. Вембер. Kyiv : Publishing House “Condor”, 2022. 388 p.
4. Довкілля України 2020 : статистичний збірник / Державна служба статистики України. https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Dovk_20.pdf.
5. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. 2021. 458с. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.
6. Двостороннє співробітництво у сфері управління водними ресурсами / Державне агентство водних ресурсів України. <https://davr.gov.ua/transkordonne-spivrobitnictvo>.
7. Застосування феритних матеріалів в процесах очищення води: монографія / В.М. Радовенчик, О.І. Іваненко, Я.В. Радовенчик, Т.В. Крисенко. Біла Церква : Видавництво О.В. Пшонківський, 2020. 215 с. https://eco-paper.kpi.ua/CONTENT/literatyra/ferity_mono.pdf.
8. Магльована Т.В. Отримання нових сорбентів для системи комплексного екологічного моніторингу важких металів у стічних водах. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2017. № 1(102). С. 129–134.

9. Сакалова Г.В., Василюк Т.М. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів : монографія. Вінниця : ТОВ «Твори», 2019. 92 с.

10. Innovative Method for Water Deiron Ions Using Capillary Material / I. Trus, I. Radovenchyk, V. Halysh, E. Chuprinov, D. Benatov, O. Hlushko, L. Sirenko. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. № 23 (3). P. 174–182. <https://doi.org/10.12911/22998993/145467>.

11. Integrated use of magnetite in environmental protection measures / O. Ivanenko, V. Radovenchyk, T. Overchenko, I. Radovenchyk. *ScienceRise*. 2020. № 5. P. 57–65. DOI: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001462>.

12. Аналітична хімія поверхневих вод : монографія / Б.Й. Набиванець, В.І. Осадчий, Н.М. Осадча, Ю.Б. Набиванець. Київ : Наукова думка, 2007. 456 с. <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000002073>.

TREATING OF INDUSTRIAL SULFATE-CONTAINING EFFLUENT FROM IRON IONS BY MAGNETOSORPTION METHOD

Serhii Dovholap

Postgraduate Student at the Department of Ecology and Technology of Plant Polymers

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, s.dovholap@gmail.com

ORCID:0000-0002-2456-2249

Vyacheslav Radovenchyk

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Ecology and Plant Polymers Technology

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, dokeco@ukr.net

ORCID:0000-0001-5361-5808

Olena Otrokh

Leading Engineer at the Department of Ecology and Technology of Plant Polymers

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, otrox2204@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1570-5558

Olena Ivanenko

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Ecology and Plant Polymers Technology

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, olenka.vasaynovich@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6838-5400

Tetiana Overchenko

Candidate of Technical Sciences, Senior Teacher at the Department of Ecology and Plant Polymers Technology

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, overchenko.tanya@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5883-6228

Purpose. To extract iron ions from sulfate-containing solutions using the magnetosorption method, magnetite particles were obtained by precipitation from a mixture of iron (II) and iron (III) sulfate solutions. **Methodology.** The magnetosorption method consists in going through the process of sorption of pollutants in aqueous solutions using highly dispersed sorbents with magnetic properties. After treatment with a magnetite suspension, the simulated solutions were passed through an electromagnetic filter, and the filtrate was analyzed for the presence of iron compounds. **Results.** It was established that hydrolyzed forms of iron (III) ions are better sorbed from aqueous solutions, and the extraction efficiency of Fe^{3+} ions increases with increasing pH, and the maximum efficiency of the process corresponds to the pH of complete hydrolysis of Fe^{3+} ions. It is shown that the process of sorption of hydrolyzed forms of iron (III) by synthetic magnetite particles occurs to the full extent when the magnetite particles are in contact with the solution for 2 minutes. It

was established that in acidic solutions with an increase in $[Fe^{2+}]:[Fe^{3+}]$, the efficiency of removing iron ions decreases. **Originality.** The novelty of conducting research is the possibility of using it to obtain magnetite particles and carrying out sorption processes of iron sulfate-containing spent electrolytes and washing wastewater of electroplating production. **Practical importance.** The practical application of production effluents from the metal etching process for the purpose of water purification from iron ions with the repeated use of magnetite particles ensures the maximum standards for the discharge of purified water into the sewage. References 12, figures 5.

Key words: purification, magnetite, iron sulfate-containing solutions, ferrite, hydrolysis, sorption, magnetosorption method.

REFERENCES

1. Karpenko, M.V., Radovenchyk Ya.V., and Ivanenko O.I. (2023), Vydalennya spoluk zaliza iz mexanichnyx system ochyshchennya vody, [Removal of iron compounds from mechanical filters of household reverse osmosis water purification systems], Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya, no. 2, pp. 127–132.
2. Frolova, L.A. (2018), «Vykorystannya vidprats'ovanykh travyl'nykh rozchyniv dlya vyrobnytstva zhovtykh zalizooksydnykh pihmentiv», [The use of spent pickling solutions for the production of yellow iron oxide pigments], Modern problems of Metallurgy, no. 21(1), pp. 82–86.
3. Ivanenko, O.I., Nosachova, Yu.V., Ovsiankina, V.O., and Vember, V.V. (2022), [Technoecology, Publishing House “Condor”], Kyiv, Ukraine, 388 p.
4. Statystychnyy zbirnyk «Dovkillya Ukrainy 2020» [Statistical publication «Environment of Ukraine 2020»], State Statistics Service of Ukraine.
5. «Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukrainy u 2021 rotsi», [National report on the state of the natural environment in Ukraine in 2021], Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. 2021. 458 p.
6. «Dvostoronnye spivrobitnytstvo u sferi upravlinnya vodnymy resursamy», [Bilateral cooperation in the field of water resources management] State Water Resources Agency of Ukraine.
7. Radovenchyk, V.M., Ivanenko, O.I., Radovenchyk, Ya.V., and Krysenko, T.V. (2020), «Zastosuvannya ferytnykh materialiv v protsesakh ochyshchennya vody: monohrafiya», [The use of ferrite materials in water purification processes: a monograph], Vydavnytstvo O.V. Pshonkivskyy, Bila Tserkva, Ukraine, 215 p.
8. Maglyovana, T.V. (2017), «Otrymannya novykh sorbentiv dlya systemy kompleksnoho ekolohichnoho monitorynhu vazhkykh metaliv u stichnykh vodakh», [Obtaining new sorbents for the system of complex ecological monitoring of heavy metals in wastewater], Visnyk KrNU imeni Mykhayla Ostrohrads'koho, no 1(102), pp. 129–134.
9. Sakalova, G.V., and Vasylynych, T.M. (2019), «Doslidzhennya efektyvnosti ochyshchennya stichnykh vod vid ioniv vazhkykh metaliv z vykorystannyam pryrodnykh adsorbentiv: monohrafiya» [Research on the effectiveness of wastewater purification from heavy metal ions using natural adsorbents: monograph], TOV «Tвори», Vinnytsya, Ukraine, 92 p.
10. Trus, I., Radovenchyk, I., Halysh, V., Chuprinov, E., Benatov, D., Hlushko, O., and Sirenko L. (2022), Innovative Method for Water Deiron Ions Using Capillary Material, Journal of Ecological Engineering, no. 23(3), pp. 174–182.
11. Ivanenko, O., Radovenchyk, V., Overchenko, T., and Radovenchyk, I. (2020), Integrated use of magnetite in environmental protection measures, ScienceRise, no. 5, pp. 57–65.
12. Nabivanets, B.Y., Osadchiy, V.I., Osadcha, N.M., and Nabivanets, Yu.B. (2007), «Analychna khimiya poverkhnevnykh vod: monohrafiya», [Analytical chemistry of surface waters: a monograph], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine, 456 p.

Стаття надійшла 27.09.2023