

ДОВГОЛАП СЕРГІЙ

КПІ імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0002-2456-2249>

РАДОВЕНЧИК ВЯЧЕСЛАВ

КПІ імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0001-5361-5808>

ОТРОХ ОЛЕНА

КПІ імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0009-0006-1570-5558>

ІВАНЕНКО ОЛЕНА

КПІ імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0001-6838-5400>

ОВЕРЧЕНКО ТЕТЯНА

КПІ імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0002-5883-6228>

ЗАСТОСУВАННЯ СИНТЕТИЧНОГО МАГНЕТИТУ, ОТРИМАНОГО З ЗАЛІЗОСУЛЬФАТВМІСНИХ РОЗЧИНІВ, ЯК СОРБЕНТУ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ХРОМАТІВ ІЗ СТІЧНИХ ВОД

Наведено результати досліджень по вилученню хроматів із стічних вод з використанням високодисперсних сорбентів з магнітними властивостями, що отримувались шляхом осадження з суміші розчинів сульфатів заліза (II) і заліза (III). Встановлено, що максимальна ефективність видалення хроматів відбувається при використанні магнетиту з $K=[Fe^{2+}]:[Fe^{3+}]=2$. Визначено, що зі збільшенням концентрації хроматів у розчині та температури проведення процесу ефективність вилучення хрому (VI) зростає при збільшенні K . Встановлено, що поряд з процесами відновлення в розчині матиме місце утворення малорозчинних хімічних сполук за участю хроматів та сорбція хроматів поверхневими частками $Fe(OH)_3$. Запропоновано технологічну схему очищення води від хроматів синтетичним магнетитом. Відпрацьований сорбент доцільно використовувати в металургії для знешкодження монооксиду вуглецю димових газів.

Ключові слова: хромати, магнетит, залізосульфатвмісні розчини, стічна вода, сорбція, відновлення.

SERGIY DOVHOLAP, VYACHESLAV RADOVENCHYK, OLENA OTROKH, OLENA IVANENKO, TETIANA
OVERCHENKO

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF SYNTHETIC MAGNETITE OBTAINED FROM SOLUTIONS CONTAINING IRON SULFATE AS A SORBENT FOR REMOVAL OF CHROMATES FROM WASTEWATER

The problem of decontamination of chromate-containing wastewater of galvanic industries is related to the extreme toxicity of these compounds, as they are among the most environmentally dangerous with general toxic, cumulative, allergenic, carcinogenic, and oxidizing effects. Chromium (VI) compounds are not hydrolyzed during pH adjustment, and therefore cannot be extracted by traditional reagent methods. For the disposal of chromate-containing wastewater, it is necessary to separately provide for the process of chromate recovery. In most cases, the process is carried out with the help of chemical reagents and is accompanied by water salinization and the formation of a significant amount of highly dispersed sediments, which are difficult to separate from water. Among the iron compounds with magnetic properties, magnetite Fe_3O_4 is the most suitable for wastewater treatment, which has significant advantages: rather simple formation during precipitation of a mixture of Fe (II) and Fe (III) salt solutions, as well as stability in water in a wide pH range. Magnetite can be obtained from spent steel pickling solutions, the reserves of which in Ukraine amount to millions of cubic meters and the disposal of which is a separate acute environmental problem. The results of research on the extraction of chromates from wastewater using highly dispersed sorbents with magnetic properties obtained by precipitation from a mixture of iron (II) and iron (III) sulfate solutions are given in work. It was established that the maximum efficiency of chromate removal occurs when using magnetite with $K=[Fe^{2+}]:[Fe^{3+}]=2$. It was determined that with an increase in the concentration of chromates in the solution and the temperature of the process, the efficiency of chromium (VI) extraction increases with increasing K . It was established that along with the reduction processes in the solution, the formation of poorly soluble chemical compounds with the participation of chromates and the sorption of chromates by surface particles of $Fe(OH)_3$. A technological scheme for purifying water from chromates with synthetic magnetite is proposed. It is advisable to use the spent sorbent in metallurgy to neutralize carbon monoxide in flue gases.

Key words: chromates, magnetite, iron sulfate-containing solutions, waste water, sorption, recovery.

Постановка проблеми

Широке використання металів у народному господарстві передбачає покриття виробів з них різноманітними захисними речовинами. Значну частину таких покриттів складають гальванічні плівки, осаджені на поверхні виробів у середовищі електролітів. Гарні захисні властивості мають покриття з хрому. При використанні хрому у процесах пасивації та освітлення на машинобудівних підприємствах утворюється велика кількість стічних вод, забруднених хроматами. Проблема знешкодження хроматів ускладнюється надзвичайною токсичністю цих сполук, так як вони відносяться до найбільш екологічно небезпечних з загальнотоксичною, кумулятивною, алергенною, канцерогенною та окиснювальною дією [1]. Так, ГДК на скид шестивалентного хрому у каналізаційну систему м. Києва досягає $0,1 \text{ мг/дм}^3$ [2]. Згубний вплив іонів $Cr(VI)$ на флору і фауну призводить до гальмування процесів самоочищення водних джерел, також від його

впливом погіршується утворення осадів у відстійниках і підсилює утворення плівок на біофільтрах на станція водоочищення. Хром (VI) акумулюється в тканинах рослин і негативно впливає на їх розвиток, тому не можна використовувати для поливу воду, яка містить навіть сліди хрому.

Згідно статистичних даних [3], щорічне скидання в поверхневі водні об'єкти України іонів шестивалентного хрому у складі неочищених та недостатньо очищених стічних вод в середньому складає 1,3 т. Звісно, така кількість іонів Cr(VI) значно менша порівняно з щорічним скиданням іонів заліза у кількості 414 т у складі залізистих стоків, зокрема, після процесів травлення гальванічних виробництв, проте в процесі моніторингу стану водних об'єктів України спостерігається перевищення середньорічних концентрацій іонів Cr(VI) (згідно із ГДК для рибогосподарських водойм 0,001 мг/дм³) в басейнах рік Сіверського Дінця, Вісли, в р. Прип'яті [4].

Тому залишається актуальним питання попередження попадання токсичного шестивалентного хрому в водні ресурси України.

Аналіз останніх джерел

Сполуки хрому (VI) не гідролізуються при коригуванні рН, а тому не піддаються вилученню традиційними реагентними методами. Для знешкодження хроматмістких стічних вод необхідно окремо передбачати процес відновлення хроматів. У більшості випадків це проводиться за допомогою хімічних реагентів та супроводжується засоленням води і утворенням значної кількості високодисперсних осадів, які важко відділяються від води. Разом з бісульфітом натрію, воднем, вуглецем та іншими речовинами часто використовують для цих цілей сполуки заліза (II), які утворюють, крім осаду Cr(OH)₃, ще й осад Fe(OH)₃. Сполуки заліза з магнітними властивостями, крім легкого відновлення хроматів, значно простіше відділяються від води [5].

Серед сполук заліза з магнітними властивостями найбільш придатний для очищення стічних вод магнетит Fe₃O₄. Він має значні переваги: досить просте утворення при осадженні лугом суміші розчинів солей Fe (II) та Fe (III), а також стійкість у воді в широкому діапазоні рН. Одержувати магнетит можна з відпрацьованих розчинів травлення сталі, запаси яких в Україні нараховують мільйони кубічних метрів і утилізація яких є окремою гострою екологічною проблемою [6, 7]. Відновлення хроматів магнетитом практично з однаковою швидкістю проходить у кислому і в лужному середовищах, що дозволяє відмовитися від коригування рН і уникнути додаткового засолення води. Наявність хороших магнітних властивостей дозволяє використовувати для відділення часточок магнетиту від води магнітне поле, що значно скорочує тривалість технологічного циклу та капітальні й експлуатаційні витрати.

Незважаючи на гостроту проблеми знешкодження методом феритизації хроматів та публікацій на цю тему [8, 9], процеси видалення їх сполуками заліза з магнітними властивостями з водних розчинів не можна визнати достатньо вивченими. Про можливість сорбції сполук хрому (VI) частинками магнетиту відомо [5], однак це питання вивчено недостатньо в випадку використання магнетиту, утвореного з сульфатів заліза (II) та (III). Наприклад, зовсім залишилося поза увагою дослідників самі механізми видалення і вплив на них температури і концентрації хроматів, рН середовища тощо. Вивченню цих питань присвячена дана стаття.

Метою роботи було встановлення оптимальних умов видалення з модельних розчинів сполук хрому (VI) за допомогою високодисперсних часточок магнетиту, отриманих з залізосульфатвмісного розчину.

Виклад основного матеріалу

В роботі частинки магнетиту були отримані шляхом осадження з суміші розчинів сульфатів заліза (II) і заліза (III) з відповідним співвідношенням $K=[Fe^{2+}]/[Fe^{3+}]$. Потім його залужували за допомогою NaOH при 30–35 °С до рН=9,5–10. Одержану суміш часточок магнетиту відмивали декантацією від сульфату натрію до нейтральної реакції і зберігали під шаром дистильованої води, з якої попередньо видаляли кисень. Наявність магнітних властивостей визначали за методикою [10].

Методика проведення експерименту передбачала приготування водного розчину FeSO₄·7H₂O і Fe₂(SO₄)₃·9H₂O з концентрацією іонів Fe²⁺, Fe³⁺ відповідно 5,59 і 11,17 г/дм³ (16,76 г/дм³ іонів заліза), відповідно солей заліза 27,8 і 56,2 г/дм³, що відповідає стехіометричному відношенню [Fe²⁺]:[Fe³⁺]=0,5 у складі природного магнетиту. Процес осадження при рН= 9,0 – 9,5 за допомогою NaOH описується рівнянням:



В подальшому співвідношення по іонам Fe²⁺, Fe³⁺ змінювали до 1 (відповідно 8,38 і 8,38 г/дм³); 1,4 (відповідно 9,78 і 6,98 г/дм³); 1,8 (10,78 і 5,98 г/дм³); 2,0 (відповідно 11,17 і 5,59 г/дм³); 2,2 (відповідно 11,52 і 5,24 г/дм³); 2,6 (відповідно 12,10 і 4,66 г/дм³).

Схема експериментальної установки наведена на рис.1.

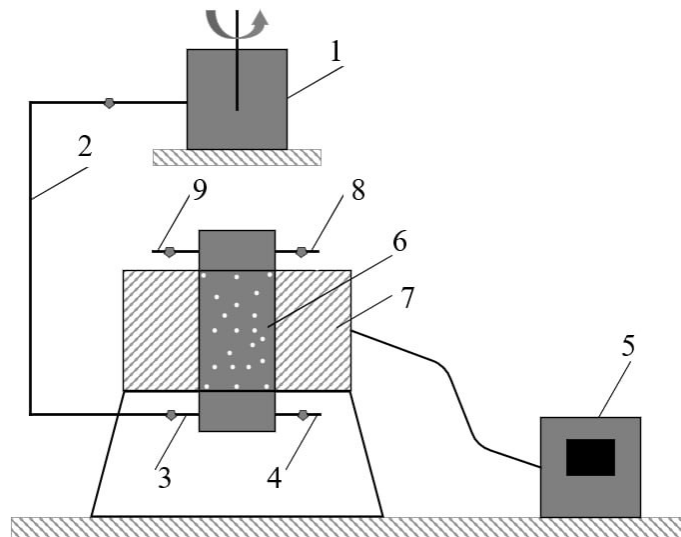


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – склянка з мішалкою; 2 – трубопровід для подачі стічної води; 3 – вхідний патрубок; 4, 8 – промивні патрубки; 5 – блок живлення; 6 – феромагнітна насадка; 7 – намагнічуюча система; 9 – патрубок для зливу фільтрату

Для проведення експерименту використовувалася така методика. У 100 см³ модельного розчину K₂Cr₂O₇ з визначеним за допомогою NaOH чи H₂SO₄ водневим показником та температурою додавали дозу суспензії магнетиту та перемішували 10 хв. Після обробки суспензією магнетиту модельні розчини пропускали через електромагнітний фільтр у вигляді соленода, робочий об'єм якого заповнений частками фериту розміром 1,5–2,0 мм. За допомогою джерела постійного струму в робочому об'ємі фільтру створювалося магнітне поле напруженістю 130 кА/м. При фільтруванні суспензії магнетиту через такий фільтр феромагнітні часточки магнетиту з сорбованими на його поверхні хроматами надійно фіксувалися в його порах, а відібрані проби фільтрату аналізували на наявність хроматів колориметричним методом з використанням дифенілкарбазиду по методиці [11]. Періодично фільтр через патрубки промивали дистильованою водою при вимкненому джерелі живлення. В експериментах використовували хімічні реagentи кваліфікації ЧДА. Паралельно проводили 4–6 дослідів, на основі обробки результатів яких будували криві та аналізували основні аспекти досліджуваного процесу. Методами математичної статистики встановлена задовільна відтворюваність результатів.

Стехіометричний склад магнетиту описується формулою FeO·Fe₂O₃, і при відсутності окислення поверхневих іонів Fe²⁺ розчиненим у воді киснем співвідношення концентрацій [Fe²⁺]/[Fe³⁺]=0,5. В реальних умовах це співвідношення буде ще нижчим, а кількість Fe²⁺ на поверхні часточок магнетиту буде меншою. Кількість Cr⁶⁺, які можуть бути відновлені поверхневими іонами Fe²⁺, також буде незначною. Проблема може бути вирішена завдяки збільшенню концентрації Fe²⁺ у поверхневому шарі. Авторами [12] запропоновано застосовувати для видалення з води іонів Cr⁶⁺ частки магнетиту мають магнітні властивості в діапазоні K=0–3,0, причому максимум магнітних характеристик відповідає стехіометричному складу (K=0,5). При відхиленні від стехіометрії у будь-якій бік магнітні властивості знижуються. Збільшення K від стехіометричного супроводжується відповідним збільшенням кількості поверхневих іонів Fe²⁺ в частках магнетиту. Найбільше ефективність видалення іонів Cr⁶⁺ зростає при K>1,8. При цьому необхідно враховувати відповідне зниження магнітних властивостей, особливо у випадку застосування для відділення відпрацьованих часточок від магнітних чи електромагнітних фільтрів.

Детальні дослідження, проведені в діапазоні рН=3–11 для різних зразків магнетиту, підтвердили практично однакову швидкість знешкодження хроматів у кислому і лужному середовищах. Незначне підвищення спостерігається при рН≤3, але оскільки при таких значеннях магнетит починає розчинятися, то з практичної точки зору цей факт значення не має, а пояснюється простим розчиненням часточок, що супроводжується переходом у розчин іонів заліза.

Для очищення стічних вод з однаковою концентрацією хроматів у залежності від умов необхідні різні концентрації магнетиту. Встановлено (рис. 2), що при K=2,0 для видалення 100 % хроматів достатньо використовувати 20 мг магнетиту на 1 мг Cr⁶⁺, при K=1,0 при застосуванні 50 мг магнетиту на 1 мг Cr⁶⁺ досягається 70 % ефективність очищення, а при K=0,5 навіть при концентрації 50 мг магнетиту на 1 мг Cr⁶⁺ ефективність очистки не перевищує 30 %. Таким чином, ефективне співвідношення [магнетит]/[Cr⁶⁺] при використанні магнетиту з K=2 знаходяться на рівні 20.

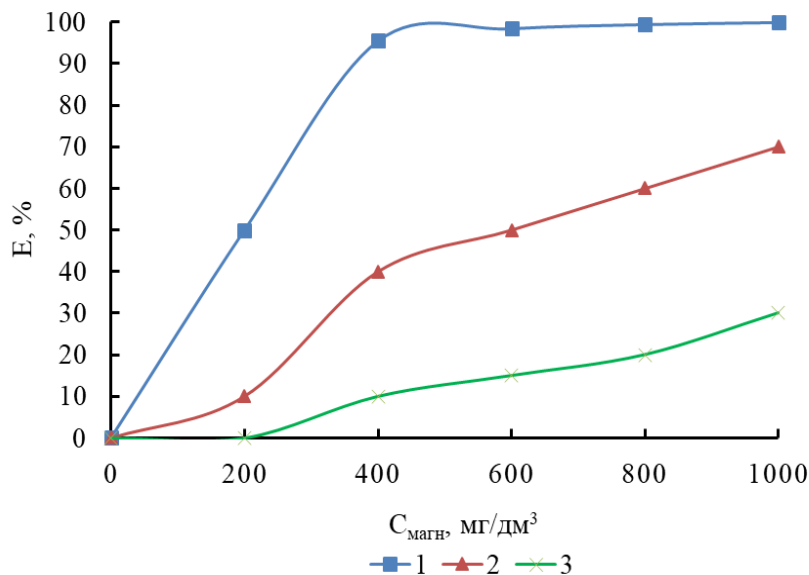


Рис. 2. Залежність ефективності видалення хроматів від концентрації магнетиту при $C_{\text{Cr}^{6+}}=20$ мг/дм³, pH=8, $t=25$ °C і різних K: 1 – 2; 2 – 1; 3 – 0,5

Концентрація хроматів у початкових розчинах також суттєво впливає на ефективність їх видалення. Як видно з рис. 3, зі збільшенням концентрації хроматів у розчині для зразків магнетитів з постійним K ефективність їх вилучення також зростає. Зростає вона і при збільшенні K. Раніше передбачалося, що процес вилучення хроматів частками магнетиту базується на відновленні Cr (VI) поверхневими іонами Fe^{2+} та сорбції відновлених іонів Cr^{3+} чи їх гідролізованих форм поверхнею магнетиту. Однак, як видно з ізотерми сорбції (рис. 3), ефективність вилучення хроматів зростає при збільшенні рівноважної концентрації. При цьому кількість поверхневих іонів Fe^{2+} в частках магнетиту залишається постійною. Очевидно, що в процес включаються додатково інші механізми, а під сорбційною здатністю необхідно розуміти сукупність усіх механізмів, які беруть участь у процесі вилучення хроматів.

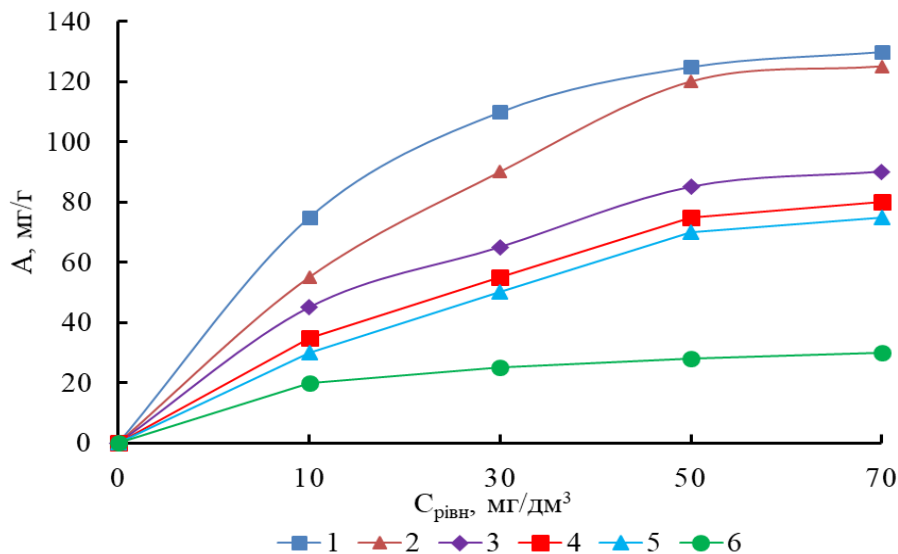


Рис. 3. Залежність сорбційної здатності зразків магнетиту від рівноважної концентрації хроматів при pH=8, $t=25$ °C і різних K: 1 – 2,6; 2 – 2,2; 3 – 1,8; 4 – 1,4; 5 – 1,0; 6 – 0,5

При надлишку хроматів у розчині всі поверхневі іони частинок магнетиту представлені іонами Fe^{3+} . В системі $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CrO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ можуть утворюватися різноманітні малорозчинні хімічні сполуки, найбільш поширені з яких FeOHCrO_4 та $\text{Fe}_2(\text{CrO}_4)_3$ [12]. У присутності Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ti^{3+} (Me) можуть кристалізуватися подвійні хромати $\text{MeFe}_3(\text{OH})_6(\text{CrO}_4)_2$, $\text{MeFe}(\text{CrO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MeFe}(\text{CrO}_4)_2$ та інші сполуки. В обґрунтуванні хімічної концепції сорбції хроматів на гідроксиді заліза (III) відмічено прямолінійну залежність сорбційної ємності гідроксиду $\text{Fe}(\text{OH})_3$ від рівноважної концентрації хроматів. Очевидно, і в нашому випадку, крім процесу відновлення хроматів та сорбції гідроксиду, матиме місце утворення малорозчинних хімічних сполук за участю хроматів та сорбція хроматів поверхневими частками $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Нами було встановлено, що зі збільшенням температури сорбційна здатність магнетиту зростає (рис. 4). Це може вважатися підтвердженням існування сорбційного механізму видалення хроматів. За

нормальних умов іони OH^- , що знаходяться на поверхні часточок, здатні обмінюватися на аніони. При підвищенні температури кінетична енергія часточок зростає настільки, що стає можливим обмін OH^- на хромат-аніони.

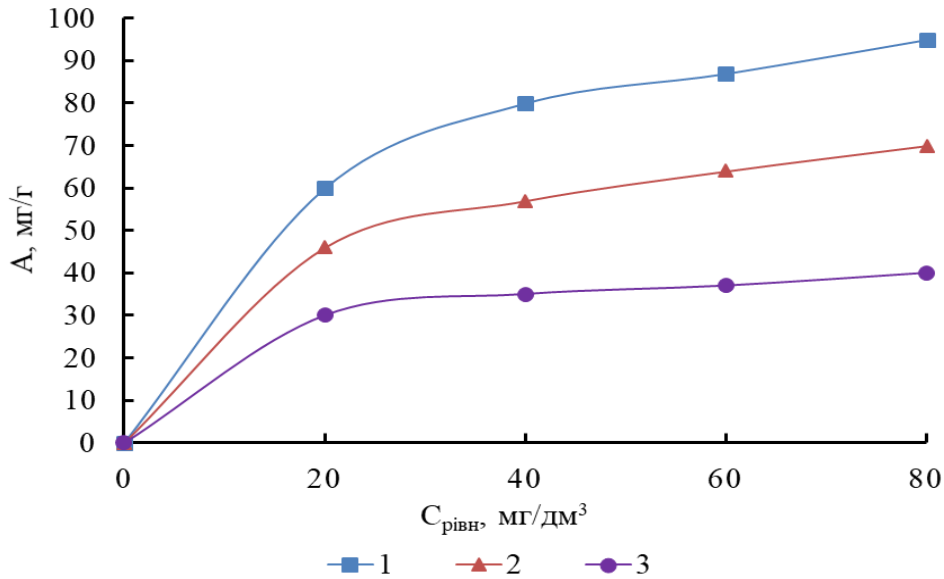


Рис. 4. Залежність сорбційної здатності зразків магнетиту з $K=1,0$ від рівноважної концентрації хроматів при $\text{pH}=8$ і різних температурах, °C: 1 – 80, 2 – 60, 3 – 40

Однак використання значних рівноважних концентрацій при очищенні стічних вод недопустиме внаслідок значних залишкових концентрацій хроматів в обробленій воді, що заважає її скиду в каналізацію, та наявності малорозчинних хроматів в осадах, що передбачає додаткову обробку для їх відновлення.

Тому в практичних технологіях необхідно виходити з умови відновлення всіх хроматів часточками магнетиту. Варіант технологічної схеми такого процесу представлено на рис. 5.

У блок приготування магнетиту подається суміш іонів Fe^{2+} та Fe^{3+} у відповідних співвідношеннях або Fe^{2+} з подальшими окисленням частини його до Fe^{3+} . У присутності NaOH в обробленій таким чином суміш спостерігається утворення часточок магнетиту. Утворену суспензію дозують у реактор, куди одночасно подають стічну воду, яка містить хромати. Оскільки в більшості випадків хроматвмісні стічні води мають кислу реакцію, то одночасно проходить їх нейтралізація. Під час контакту часточок магнетиту зі стічною водою відбувається відновлення хроматів та сорбція утворених сполук поверхнею часточок.

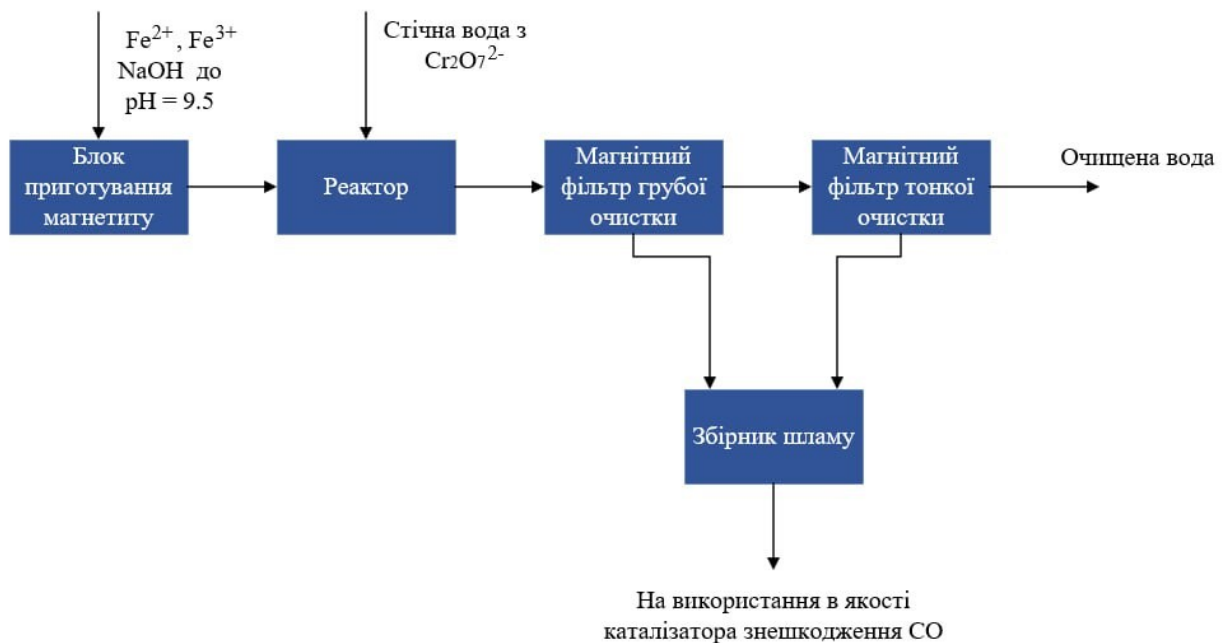


Рис. 5. Технологічна схема очищення води від хроматів синтетичним магнетитом

використовувати в металургії для знешкодження монооксиду вуглецю димових газів [13, 14].

Висновки

Таким чином, при знешкодженні хроматвмісних вод синтетичним магнетитом, утвореним з залізусульфатвмісних відпрацьованих розчинів травлення сталі, крім процесів відновлення хромат-іонів, окислення поверхневих іонів Fe^{2+} до Fe^{3+} , сорбції іонів Cr^{3+} чи гідроксидів $Cr(OH)_3$, спостерігається відновлення поверхнею його часточок хромат-аніонів, в основі якого може бути як утворення хімічних сполук, так і сорбційний механізм. Оптимальними умовами проведення процесу видалення з модельних розчинів сполук хрому (VI) за допомогою високодисперсних часточок магнетиту, отриманих з залізусульфатвмісного розчину при співвідношенні концентрацій $K=[Fe^{2+}]:[Fe^{3+}]=2$, є проведення процесу за підвищеної температури та використанні магнетиту з витратою 20 мг на 1 мг Cr^{6+} .

Література

1. Донченко М. І. Екологічна безпека гальванотехніки. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка / М. І. Донченко, С. В. Фроленкова, Т. І. Мотронюк. – Київ, 2018. – 202 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24936/3/Ekologichna_bezpeka_galvanotekhniki.doc
2. Проект розпорядження виконавчого органу Київської міської ради (Київської міської державної адміністрації). Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення міста Києва. Дата оприлюднення 30 березня 2020 року. <https://kyivcity.gov.ua>
3. Державна служба статистики України Статистичний збірник «Довкілля України 2020». [Електронний ресурс] / Державна служба статистики України // 2020. https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Dovk_20.pdf.
4. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. [Електронний ресурс] / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. – 2021. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.
5. Радовенчик В. М. Застосування феритних матеріалів в процесах очищення води / В. М. Радовенчик, О. І. Іваненко, Т. В. Крисенко. – Біла Церква: Пшонківський О., 2020. – 215 с. https://ecoraper.kpi.ua/CONTENT/literatya/ferity_mono.pdf
6. 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>
7. Самченко Д., Кочетов Г., Васильєв О., Дереча Д., Скирта Ю., Ластівка О. Енергоощадна технологія переробки відпрацьованих травильних розчинів з одержанням феромагнітних сполук. Екологічна безпека та природокористування. 2022. № 43(3). С. 22–34. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.22-34>
8. Пахомов Д., Кочетов Г., Самченко Д. Феритизаційна очистка стічних вод від сполук хрому (VI) з використанням електромагнітної імпульсної активації. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. 2019. № 32. С. 15-23.
9. Пахомов Д., Кочетов Г., Ємчура Б. Очистка стічних вод від сполук хрому з організацією оборотного водопостачання підприємств. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. 2021. № 37. С. 65-73.
10. Ivanenko O., Radovenchik V., Overchenko T., Radovenchik I. Integrated use of magnetite in environmental protection measures. *ScienceRise*. 2020. № 5. P. 57–65. <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001462>.
11. Аналітична хімія поверхневих вод / 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>
12. Гончарук В. В. Отримання та використання високодисперсних сорбентів з магнітними властивостями / В. В. Гончарук, В. М. Радовенчик, М. Д. Гомеля. – Київ: Графіка, 2003. – 263 с.
13. Ivanenko O., Radovenchik V., Radovenchik I. Neutralization of carbon monoxide by magnetite-based catalysts. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. № 5/3(55). P. 24–28.
14. Ivanenko O., Gomelya N., Shablii T., Trypolskyi A., Nosachova Yu., Leleka S., Trus I., Strizhak P. Use of metal oxide-modified aerated concrete for cleaning flue gases from carbon monoxide. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. №22(5). P. 104–113. <https://doi.org/10.12911/22998993/13587>

References

1. Donchenko M. I. Ekologichna bezpeka halvanotekhniki. Stichni vody. Mekhanichna ta sorbtsiyna ochystka/ Donchenko M. I., Frolenkova S. V., Motronyuk T. I. – pidruchnyk. Kyiv, 2018. – 202 s. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24936/3/Ekologichna_bezpeka_galvanotekhniki.doc
2. Proyeekt rozporjadzhennya vykonavchoho orhanu Kyuyivskoyi miskoyi rady (Kyuyivskoyi miskoyi derzhavnoyi administratsiyi). Pro zatverdzhennya Pravyl pryumannya stichnykh vod do system tsentralizovanoho vodovidvedennya mista Kyueva. Data opryludnennya 30 bereznya 2020 roku. <https://kyivcity.gov.ua>
3. State Statistics Service of Ukraine Statistical publication «Environment of Ukraine 2020» / State Statistics Service of Ukraine//2020. https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Dovk_20.pdf.

4. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2021 rotsi / Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. – 2021. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.
5. Radovenchuk V. M. Zastosuvannya ferytynykh materialiv v protsesakh ochyshchennya vody/ Radovenchuk V. M., Ivanenko O. I., Radovenchuk Ya. V., Krysenko T. V – Bila Tserkva: Vydavnytstvo O. V. Pshonkivskyy, 2020. – 215 c. https://ecopaper.kpi.ua/CONTENT/literatyra/feryty_mono.pdf
6. Frolova L. A. Vykorystannya vidpratsovanykh travlynykh rozchyniv dlya vyrobnytstva zhovtykh zalizooksydnykh pihmentiv. Modern problems of Metallurgy. 2018. No 21(1). S. 82–86.
7. Samchenko D., Kochetov H., Vasylyev O., Derecha D., Skyrta Y. U., Lastivka O. Enerhooshhadna tekhnolohiya pererobky vidpratsovanykh travlynykh rozchyniv z oderzhannyam feromahnitnykh spoluk. Environmental Safety and Natural Resources. 2022. No 43(3). S. 22–34.
8. Pakhomov D., Kochetov H., Samchenko D. Ferytyzatsiyna ochystka stichnykh vod vid spoluk khromu (VI) z vykorystanniam elektromahnitnoyi impulsnoyi aktyvatsiyi. Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliki. 2019. No 32. S. 15-23.
9. Pakhomov D., Kochetov H., Yemchura B. Ochystka stichnykh vod vid spoluk khromu z orhanizatsiyeyu oborotnoho vodopostachannya pidpriumstv. Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliki. 2021. No 37. S. 65-73.
10. Ivanenko O., Radovenchuk V., Overchenko T., Radovenchuk I. Integrated use of magnetite in environmental protection measures. ScienceRise. 2020. No 5. S. 57–65.
11. Analitychna khimiya poverkhnevyykh vod / B. Y . Nabyvanets, V. I. Osadchyy, N. M. Osadcha, Yu. B. Nabyvanets– Kyiv: Naukova dumka, 2007. 456 s. <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000002073>
12. Honcharuk, V. V. Otrymannya ta vykorystannya vysokodispersnykh sorbentiv z mahnitnymy vlastyvostryamy/ V. V Honcharuk, V. M. Radovenchuk, M. D. Homelya –Kyiv: Hrafika, 2003. 264 s.
13. Ivanenko O., Radovenchuk V., Radovenchuk I. Neutralization of carbon monoxide by magnetite-based catalysts. Technology Audit and Production Reserves. 2020. No 5/3(55). S. 24–28.
14. Ivanenko O., Gomelya N., Shabliy T., Trypolskyi A., Nosachova Yu., Leleka S., Trus I., Strizhak P. Use of metal oxide-modified aerated concrete for cleaning flue gases from carbon monoxide. Journal of Ecological Engineering. 2021. No 22(5). S. 104–113.