

## ФЕРИТИЗАЦІЙНА ОЧИСТКА СТІЧНИХ ВОД ВІД СПОЛУК ХРОМУ (VI) З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІМПУЛЬСНОЇ АКТИВАЦІЇ

Дмитро Пахомов <sup>1</sup>, Геннадій Кочетов <sup>2</sup>, Дмитро Самченко <sup>3</sup>

Київський національний університет будівництва та архітектури

31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup> pakhomov4444@i.ua, orcid.org/0000-0002-0953-0302

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

<sup>3</sup> канд. тех. наук, sama30071988@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3305-8180

DOI: 10.32347/2524-0021.2021.37.65-73

**Анотація.** Розглядаються питання, що пов'язані з перспективою впровадження новітніх технологій, спрямованих на досягнення енергоефективності в сфері водопостачання, ресурсозбереження в матеріалоемних процесах на промислових підприємствах та запобігання забруднення довкілля. Проведено дослідження феритизаційної очистки стічних вод від сполук хрому, які відносяться до першого класу небезпеки. Порівняно ефективність застосування термічної та електромагнітної імпульсної активації процесу. Створено відповідні експериментальні установки та вивчені і визначені основні параметри процесу очистки: співвідношення іонів заліза (II) та хрому (VI), силу магнітного поля, частоту електромагнітних імпульсів, тривалість процесу феритизації, температуру та pH реакційної суміші. Досліджено та науково обґрунтовано доцільність використання електромагнітної імпульсної активації реакційної суміші шляхом пропускання електромагнітних імпульсів крізь реакційну суміш. Визначено раціональні значення сили та частоти електромагнітного поля при використанні такого способу активації, які складають 0,01 – 0,14 Тл та 1 Гц відповідно, а також співвідношення концентрацій іонів важких металів  $Fe^{2+}/Cr^{6+} = 10/1$  для промивних вод лінії хромування. Показано, що очищена вода відповідає вимогам 1 категорії при повторному використанні її на виробництві. Результати рентгеноструктурного аналізу осадів феритизації засвідчили, що стійкі кристалічні фази, такі як ферити хрому та магнетит, утворюються при збільшенні сили магнітного поля. Хімічна стійкість осадів дає змогу безпечно їх утилізувати. Встановлено, що цей метод електромагнітної імпульсної активації не поступається термічному, а проведені техніко-економічні розрахунки підтвердили значне здешевлення промислових витрат при його застосуванні.

**Ключові слова:** очистка стічних вод, феритизація, хром, електромагнітна імпульсна активація.

### ВСТУП

У технологічних процесах кольорової металургії, машинобудування, а також електронної, хімічної та електротехнічної промисловості утворюється значна кількість відпрацьованих електролітів із високою концентрацією хрому. Існуючі методи для вилучення іонів важких металів зі стічних вод [1,2] дають позитивний результат, проте більшість з них є не раціональними, оскільки затрати енергії,

реагентів та обладнання для них є високовартісними [3,4]. Осад, що утворюється після відпрацювання електроліту несе потенційну загрозу навколишньому середовищу, оскільки сполуки хрому (III), а особливо хрому (VI), токсичні для людини, а також флори та фауни. Їх скид у водойми в свою чергу також наносить економічні збитки країні за рахунок втрати цінних кольорових металів [5]. На даний момент в Україні діють більш 1000

гальванічних підприємств. Орієнтовний об'єм стічних вод з цих виробництв в країні сягає понад 500 млн м<sup>3</sup> на рік. Рівень регенерації важких металів та очищеної води становить не більше 10%, тоді як у країнах Західної Європи він сягає 97-98% [6]. Тому підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження високоефективного очисного обладнання, розробка маловідходних енергоефективних технологій із замкненими системами ресурсообігу є пріоритетним напрямком розвитку Українських промислових підприємств [7].

### АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для вилучення важких металів використовують мембранні, сорбційні, реагентні, біохімічні, електрохімічні, методи [8-12]. Найбільш широко застосовуються у вітчизняній практиці традиційні реагентні технології очищення промислових стічних вод [13-14].

Перспективним є використання методу феритизації для очистки гальванічних стічних вод, зокрема від сполук хрому. Останніми роками були проведені чисельні дослідження з переробки гальванічних осадів і технологічних розчинів феритизацією. Так, в роботі [15] розглянуто процес переробки гальванічних шламів з переведенням іонів нікелю, міді, цинку і заліза в нерозчинні сполуки методом феритизації. В результаті проведення процесу феритизації в лужному середовищі утворюються ферити, що мають виражені магнітні властивості та кристалічну структуру шпінелі. Такі осади легко фільтруються та відокремлюються від розчинів. Після спеціальної обробки залізо-хромові осади знаходять широке застосування як пігменти, що мають антикорозійні і магнітні властивості.

Очистці стічних вод від сполук хрому приділяється особлива увага, оскільки вони відносяться до групи високого канцерогенного ризику. Як правило реагентна очистка стічних вод, які містять сполуки шестивалентного хрому

здійснюється в дві стадії. На першій відбувається хімічне відновлення шестивалентної форми хрому в менш токсичну тривалентну; на другій – її осадження, як правило, у вигляді гідроксиду хрому (III).

У роботі [3] досліджено очистку високонцентрованих хромовміщуючих стічних вод, в якій застосовано процес феритизації з термічною активацією реакційної суміші при температурі вище 60°C. Аналіз попередніх досліджень [16] показав, що застосування способу термічної активації розчину потребує значних енергетичних витрат. Тому авторами [17] було запропоновано та обґрунтовано доцільність використання електромагнітної імпульсної (ЕМІ) обробки реакційної суміші пропусканням електромагнітних імпульсів крізь розчин. Однак даний метод не застосовувався до хромовмісних стічних вод, а також не в достатньому обсязі досліджено умови перебігу цього процесу.

Основними параметрами, які впливають на процес феритизації при застосуванні електромагнітної імпульсної активації є [18]:

- тривалість процесу;
- частота коливань електромагнітного поля, в якому знаходиться реакційна суміш;
- сила магнітного поля.

Доцільно виконати техніко-економічне обґрунтування ЕМІ активації реагентної суміші в процесі феритизації з огляду на його відсутність в попередніх роботах.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього експериментального дослідження є визначення раціональних значень для одного із ключових технологічних параметрів феритизаційної очистки з ЕМІ активацією процесу – сили та частоти магнітного поля. Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- вивчити вплив сили магнітного поля на ступінь вилучення іонів хрому з реакційної суміші;

- дослідити кількісний та якісний склад осадів феритизації при змінній силі магнітного поля;
- здійснити техніко-економічне обґрунтування ЕМІ активації процесу.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення феритизаційних досліджень використовувались модельні розчини. Вони за своїм складом і концентрацією відповідають промивній стічній воді лінії хромування.

Процес феритизації з термічною активацією процесу проводився на установці яка представлена у роботі [19]. Шість серій дослідів виконувались при наступних параметрах: змінному співвідношенні концентрацій  $Fe^{2+}/Cr^{6+}$  - 4; 6; 8; 10; 12; 15 та незмінних: рН = 10,5; Т = 70°C і  $\tau$  = 15 хв. Отриманий осад після феритизації ущільнювався протягом доби в звичайних умовах. Якість очистки стічних вод визначалась її ступенем за формулою:

$$\alpha = (C_{\text{вих.}} - C_{\text{зал.}}) \cdot 100\% / C_{\text{вих.}}$$

де  $C_{\text{вих.}}$  – вихідна концентрація іонів хрому у стічній воді, мг/л;  $C_{\text{зал.}}$  – залишкова концентрація іонів нікелю у стічній воді, мг/л.

Авторами цього дослідження розроблений лабораторний ферит-реактора в якому застосовували ЕМІ активацію реакційної суміші в процесі феритизації. (рис. 1). Концентрація основного компоненту – іону  $Cr^{6+}$  в цих розчинах складала: – 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Найкращі співвідношення іонів заліза та важкого металу:  $Fe^{2+}/Cr^{6+} = 10/1$ [18] досягалися введенням розчину сульфату заліза. Сумарна концентрація іонів важких металів становила 10 г/дм<sup>3</sup>. Коригування рН до рівня 10,5 проводилось розчином їдкого натру. Отримані суспензії поміщали в реактор, який знаходився в магнітному полі, та подавали повітряну суміш з витратою 0,2 дм<sup>3</sup>/хв на 1,0 дм<sup>3</sup> реакційної суміші. Процес електромагнітної імпульсної активації проводився при змінній силі

магнітного поля в межах від 0,001 до 0,14 Тл та інших сталих параметрах ЕМІ активації.

В результаті процесу феритизації утворювалась суспензія, тверда фаза якої відділялась центрифугуванням. Отриманий осад висушувався та подрібнювався. Фазовий склад осаду визначали методом рентгенівської дифрактометрії.

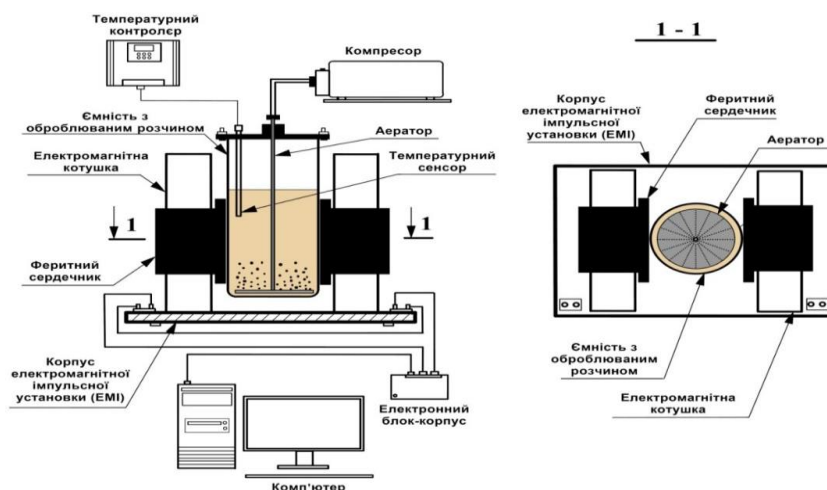
Концентрації хрому і заліза в очищеній воді, після фільтрування визначали спектрофотометричним методом згідно методик, що відповідають вимогам USEPA на відповідному сертифікованому обладнанні.

Структурний аналіз отриманих осадів проводили методом порошкової рентгенівської дифракції з покроковим режимом у  $Cu - K\alpha$  випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3М з графітовим монохроматором. Порошкові дифрактограми розшифровували за допомогою довідкових карт ICCD PDF2+ – 2003 (The International Centre for Diffraction Data) та програмного забезпечення Match V.1.9a (Crystal Impact).

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В таблиці 1 наведені результати досліджень впливу зміни співвідношення концентрацій іонів заліза та хрому (Z) в вихідному розчині на їх залишкову концентрацію в очищеній воді при термічній феритизації. Як видно із даних цієї таблиці, із підвищенням співвідношення Z відбувається поступове зменшення залишкової концентрації як заліза, так і хрому. Результати дослідів № 3 - 6, при співвідношеннях іонів  $Fe^{2+}/Cr^{6+}$ : 8:1, 10:1, 12:1 та 15:1 свідчать про те, що очищену воду можна використовувати в оборотній системі водопостачання гальванічних виробництв для операцій промивки деталей, а також для приготування електролітів.

Результати експериментів з впливу сили електромагнітного поля на ефективність вилучення іонів важких металів наведено в табл. 2



**Рис. 1.** Принципова схема лабораторної установки очистки стічних вод гальванічних виробництв методом феритизації з електромагнітною імпульсною активацією

**Fig. 1.** Schematic diagram of the laboratory installation of sewage treatment of galvanic productions by ferritization method with electromagnetic pulse activation

**Таблиця 1.** Результати очистки стічних вод від важких металів термічною феритизацією  
**Table 1.** Results of wastewater treatment from heavy metals by thermal ferritization

№ досліджу	Співвідношення Z	Концентрація, мг/л					Ступінь очистки, %	
		До очистки		Після очистки			Ступінь очистки	
		Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>
1	4:1	200	50	0,92	0,27	-	99,54	99,46
2	6:1	300		0,57	0,19	-	99,81	99,62
3	8:1	400		0,1	0,045	-	99,97	99,91
4	10:1	500		0,09	0,04	-	99,98	99,92
5	12:1	600		0,08	0,02	-	99,99	99,96
6	15:1	750		0,06	0,018	-	99,99	99,96

**Таблиця 2.** Результати очистки стічних вод від Cr<sup>6+</sup> феритизацією з ЕМІ активацією  
**Table 2.** The results of wastewater treatment from Cr<sup>6+</sup> ferritization with EMI activation

№ досліджу	Сила магнітного поля, Тл	Частота імпульсів, Гц	Тривалість процесу, хв.	Температура, С <sup>0</sup>	рН	Концентрація Cr <sup>6+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>		Ступінь вилучення Cr <sup>6+</sup> , %
						До очистки	Після очистки	
1	0,001	1	15	18	10,5	1000	0,69	99,93
2	0,004						0,28	99,97
3	0,01						0,24	99,97
4	0,04						0,32	99,96
5	0,14						0,68	99,93

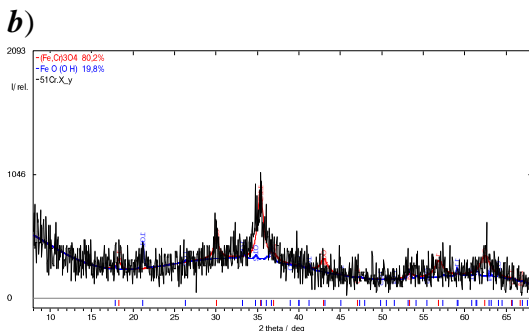
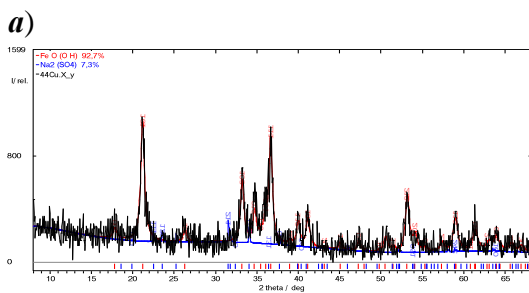
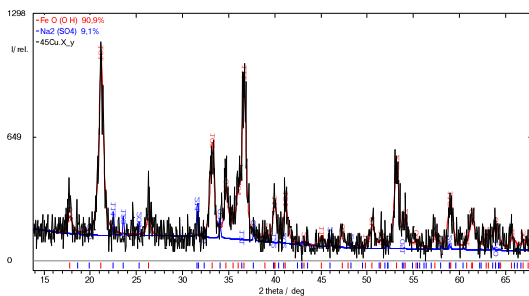
В процесі феритизації у розчині формувалась чорна дисперсна суспензія із наступним утворенням кристалічних осадів, які мають невеликий об'єм і щільну структуру. Як показують результати експериментальних досліджень з використанням ЕМІ активації процесу із збільшенням сили електромагнітного поля покращується ступінь

очистки стічних вод. Найкращі результати досягаються при силі електромагнітного поля 0,01 – 0,04 Тл. Ступінь очистки води від іонів хрому при цих умовах 99,9% та, як свідчать дані Табл. 3, з високим вмістом стійкої феромагнітної фази (Fe,Cr)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, її масова складає 70 – 80% .

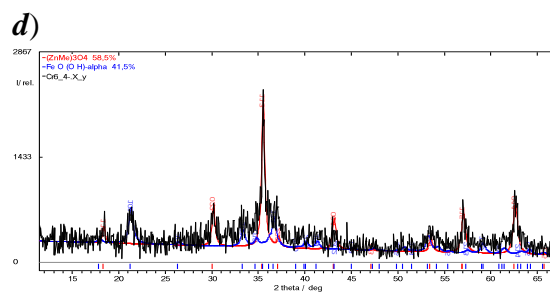
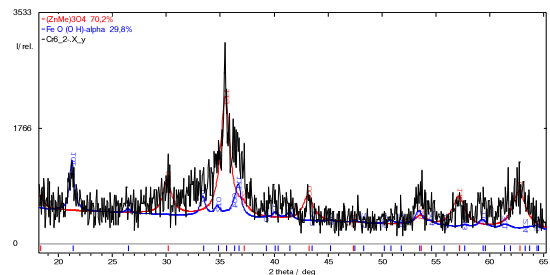
**Таблиця 3.** Результати очистки стічних вод хромування від важких металів феритизацією з ЕМІ активацією

**Table 3.** Results of chromium wastewater treatment from heavy metals by ferritization with EMI activation

№ досліду	Кількісний фазовий склад зразків осадів		
	Ідентифікована фаза	Формула	Масова частка основної фази, %
1	Хромат заліза	(Fe,Cr) <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	58
2	Оксогідроксид заліза	FeO(OH)	93
3	Хромат заліза	(Fe,Cr) <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	80
4	Хромат заліза	(Fe,Cr) <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	70
5	Оксогідроксид заліза	FeO(OH)	91



c)



e)

**Рис.2.** Структура осадів феритизації стічних вод отриманих ЕМІ активацією при силі магнітного поля (Таблиці 3): **a** – 0,001; **b** – 0,004; **c** – 0,1; **d** – 0,4; **e** – 0,14 Тл

**Fig.2.** The structure of sewage ferritization sludges obtained by EMI activation at magnetic field strength (Table 3): **a** – 0,001; **b** – 0,004 ; **c** – 0,1; **d** – 0,4; **e** – 0,14 Tl

Структурні дослідження осадів термічної феритизації свідчать про їх високу кристалічність. Ідентифікація фаз зразка отриманого осаду [19] показала, що він складається з двох фаз: хромату феруму ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) та магнетиту ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Виявлені фази мають феромагнітні властивості, кристалічну решітку шпінельного типу; вони практично нерозчинні у воді, в лужному та слабо кислому середовищі [20].

Рентгеноструктурний аналіз осадів, які отримані в результаті очистки стічних вод від хромвмістних стічних вод феритизацією з ЕМІ активацією (Рис. 2 а - d) показав, що утворення стійких фаз найкраще відбувається при зростанні сили магнітного поля. Результати структурного аналізу зразку (рис.2d) дозволяє забезпечувати формування кристалічних компонентів, таких як ферити важких металів та магнетит.

Структура та хімічна стійкість отриманих осадів дають змогу безпечно утилізувати їх, використовуючи у вихідній шихті при виготовленні лужних цементів [21].

Слід зазначити, що одним із основних переваг феритизаційної технології очистки стічних вод від сполук хрому ЕМІ з активацією реакційної суміші є суттєво менші витрати енергії у порівнянні з термічним способом. Так кількість необхідної теплової енергії при термічній активації визначається за формулою:

$$W_t = C \cdot V \cdot (T_1 - T_2),$$

де  $C$  – питома теплоємність води (4,19 кДж (кг·К));  $V$  – об'єм води, що нагрівається, л;  $T_1$  і  $T_2$  – необхідна і вихідна температура води, °С.

$W_t = 4,19 \cdot 337 \cdot (75 - 15) = 84,72$  МДж, або 23,53 кВт·год. Для електричного нагрівача, що знаходиться в нагрітому баку ККД = 95%. Тоді витрата електричної енергії на нагрів становитиме 24,77 кВт·год. Витрата електричної енергії на електромагнітно імпульсну активацію складає 0,50 кВт·год.

## ВИСНОВКИ

Нами були проведені експериментальні дослідження по визначенню ключових параметрів перебігу процесу феритизації промислових стічних вод лінії хромування. Рекомендується проводити ЕМІ активацію реакційної суміші величині рН 10,5; частоті імпульсів 1 Гц; силі електромагнітного поля в діапазоні 0,01 – 0,14 Тл та співвідношенні концентрацій іонів феруму та хрому 10/1. Результати проведених експериментів свідчать про те, що переробка стічних вод, які містять сполуки хрому, методом феритизації з ЕМІ активацією забезпечує високий ступінь очистки води від сполук важких металів, а саме 99,93 – 99,97% і за цим показником не поступається термічній активації процесу. Така якість очистки води дозволяє повторно її використання на виробництві.

При очистці стічних вод від важких металів феритизацією з ЕМІ активацією показано, що переважне утворення стійких феритних фаз відбувається при зростанні сили магнітного поля, яка забезпечує формування кристалічних компонентів в твердих відходах водоочистки.

Аналіз та узагальнення отриманих даних підтверджує перспективність використання енергоощадної феритизаційної очистки гальванічних стічних вод з ЕМІ активацією процесу порівняно з термічною.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Доллина Л. Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: Монография. – Дн-вск.: Континент, 2008. 254 с
2. Tu Y.-J., Chang C.-K., You C.-F., Wang S.-L. Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process // Journal of Hazardous Materials. 2012. Vol. 209-210. P. 379 – 384.
3. Frolova L. A., Pivovarov A. A., Anisimova L. B., Yakubovskaya Z. N., Yakubovskii A. I. The extraction of chromium (III) from concentrated solutions by ferrite method // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. 2017, Vol. 6. P. 110–115.

4. **Merentsov N. A., Bokhan S. A., Lebedev V. N., Persidskiy A. V., Balashov V. A.** System for centralised collection, recycling and removal of waste pickling and galvanic solutions and sludge. *Materials Science Forum*, 2018, 927, 183–189.
5. **Тугай А. М., Кочетов Г. М., Самченко Д. М.** Вивчення стійкості відходів очищення стічних вод, які містять сполуки міді // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки: Наук.-техн. зб., К. 2012р. Вип.20, С. 66-70.*
6. **Семенов В. В., Варламова С. И., Климов Е. С.** Очистка гальваностоків с использованием отходов производства // *ЭКиПР, 2005, № 9, С. 32-34.*
7. **Rubanov Yu. K., Tokach Yu. E., Nechaev A. F., Ognev M. N. (2009)** The galvanic productions waste waters and sludges processing with the heavy metals ions extraction. *European Journal of Natural History*. Vol. 6. P. 79-80.
8. **Religa P., Kowalik-Klimczak A.** Effect of interaction between anionic surfactants and poly(piperazine-amide) nanofiltration membranes used for chromium(III) recovery from saline solution // *Water Sci. Technol.* 2015. Vol.72. No. 10. P.1803-1809.
9. **Lu Z., Wang H., Li J., Yuan L., Zhu L.** Adsorption characteristics of bio adsorbent on chromium(III) in industrial wastewater // *Water Science and Technology*. 2015. Vol. 72. No. 7. P.1051-1061.
10. **Wang D., He S., Shan C., Ye Y., Ma H., Zhang X., Zhang W., Pan B.** Chromium speciation in tannery effluent after alkaline precipitation: Isolation and characterization // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. Vol.316. P.169-177.
11. **Sarkar M., Rahman A. K. M. L., Bhoumik N. C.** Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder // *Water Resources and Industry*. 2017. Vol.17. P.1-6.
12. **Kongjao S., Damronglerd S., Hunsom M.** Simultaneous removal of chromium and organic pollutants in tannery wastewater by electroprecipitation technique // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2007. Vol.24. No. 5. P.730-735.
13. **Frolova L., Pivovarov A.** Obtaining of brown pigments from concentrated waste water containing nickel // *Chemistry & Chemical Technology*. 2016. Vol.10. No. 2. P.209-212.
14. **Barrado E., Prieto F., Vega M., Fernandez-Polanco F.** Optimization of the operational variables of a medium-scale reactor for metal-containing wastewater purification by ferrite formation // *Water Research*. 1998. Vol.32. P.3055-3061.
15. **Podol'skaya Z. V., Buzaeva M. V., Klimov E. S.** Adsorbition of Heavy Metal Ions on Galvanic Sludges and Disposal of the Sludges in Soil // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011, Vol. 84, No. 1, P. 40–43.
16. **Kochetov G. M., Alexandrenko O. P.** Improving the purification of spent chromium electrolytes by ferritization // *Problems of water supply, drainage and hydraulics*. 2016. Vip. 27. P. 210–207.
17. **Kochetov G., Prikhna T., Kovalcheuk O., Samchenko D.** Research of the treatment of depleted Nickel-plating electrolytes by the ferritization method. *East-European jornal of enterprise technologies*, 2018 93, 54–59
18. **Ємчура Б., Пахомов Д., Кочетов Г., Самченко Д.** Дослідження впливу сили електромагнітного поля на якість очистки води від важких металів методом феритизації // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, вип.35, 2021, С. 4-10.*
19. **Пахомов Д., Кочетов Г., Ємчура Б.** Очистка стічних вод від сполук хрому з організацією оборотного водопостачання підприємств // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, вип.32, 2019, С. 15-23.*
20. **Hsing-Cheng, L., Juu-En, C., Pai-Haung, S., Li-Choung. C.** Stabilization of copper sludge by high-temperature CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> synthesis process. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150 (3), 504 – 509.
21. **Колодько А. О., Кочетов Г. М., Самченко Д. М., Пасько А. В.** Вивчення стійкості відходів очистки промислових стічних вод у складі лужних цементів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2016. Вип. 28. с. 180–186.

## REFERENCES

1. **Dollina, L. F. (2008)** Modern equipment and technologies for wastewater treatment from heavy metal salts: Monograph. Dnepropetrovsk: Continent. [in Russian]
2. **Tu Y.-J., Chang C.-K., You C.-F., Wang. S.-L. (2012)** Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process. *Journal of Hazardous*



- Materials*, 209-210. 379-384.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.050>
3. Frolova, L. A., Pivovarov, A. A., Anisimova, L. B., Yakubovskaya, Z. N., & Yakubovskii, A. I. (2017) The extraction of chromium (III) from concentrated solutions by ferrite method. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6. 110–115. Retrieved from <http://www.vhht.dp.ua/uk/arhiv-2017-6/>
4. Merentsov, N. A., Bokhan, S. A., Lebedev, V. N., Persidskiy, A. V., & Balashov, V. A. (2018). System for centralised collection, recycling and removal of waste pickling and galvanic solutions and sludge. *Materials Science Forum*. 927, 183–189. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.927.183>
5. Tugay, A. M., Kochetov, G. M., & Samchenko, D. M. (2012) The study of the sustainability of wastewater treatment containing copper compounds. *Problems of water supply, drainage and hydraulics*, 20, 66-70. [in Ukrainian]
6. Semenov, V. V., Varlamova, S. I., & Klimov, E. S. (2005) Cleaning galvanic drains using industrial waste. *EkiPR*, 9, 32-34. [in Russian]
7. Rubanov, Yu. K., Tokach, Yu. E., Nechaev, A. F., & Ognev, M. N. (2009) The galvanic productions waste waters and sludges processing with the heavy metals ions extraction. *European Journal of Natural History*. 6. 79 – 80.
8. Religa, P., & Kowalik-Klimczak, A. (2015) Effect of interaction between anionic surfactants and poly(piperazine-amide) nanofiltration membranes used for chromium(III) recovery from saline solution. *Water Sci. Technol.* 72(10). 1803-1809. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.406>
9. Lu, Z., Wang, H., Li, J., Yuan, L., & Zhu, L. (2015) Adsorption characteristics of bio adsorbent on chromium(III) in industrial wastewater. *Water Science and Technology*, 72(7). 1051-1061. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.237>
10. Wang, D., He, S., Shan, C., Ye, Y., Ma, H., Zhang, X., Zhang, W., & Pan, B. (2016) Chromium speciation in tannery effluent after alkaline precipitation: Isolation and characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 316. 169-177.
11. Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., & Bhoumik, N. C. (2017) Remediation of chromium and copper on water hyacinth (E. crassipes) shoot powder. *Water Resources and Industry*, 17. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.12.003>
12. Kongjao, S., Damronglerd, S., & Hunsom, M. (2007) Simultaneous removal of chromium and organic pollutants in tannery wastewater by electroprecipitation technique. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 24(5).730-735.
13. Frolova, L., & Pivovarov, A. (2016) Obtaining of brown pigments from concentrated waste water containing nickel. *Chemistry & Chemical Technology*, 10(2). 209-212. Retrieved from <http://ena.lp.edu.ua:8080/bit-stream/ntb/33677/1/11-209-212.pdf>
14. Barrado, E., Prieto, F., Vega, M., & Fernandez-Polanco, F. (1998) Optimization of the operational variables of a medium-scale reactor for metal-containing wastewater purification by ferrite formation. *Water Research*, 32. P.3055-3061.
15. Podol'skaya, Z. V., Buzaeva, M. V., & Klimov, E. S. (2011) Adsorption of Heavy Metal Ions on Galvanic Sludges and Disposal of the Sludges in Soil. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 84(1). 40–43.
16. Kochetov, G. M., & Alexandrenko, O. P. (2016) Improving the purification of spent chromium electrolytes by ferritization. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics*, 27. 210–207. [in Ukrainian]
17. Kochetov, G., Prikhna, T., Kovalcheuk, O., & Samchenko, D. (2018) Research of the treatment of depleted Nickel-plating electrolytes by the ferritization method. *East-European journal of enterprise technologies*. 93, 54–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133797>
18. Yemchura, B., Pakhomov, D., Kochetov, G., & Samchenko, D. (2021) Pre-study of the influence of electromagnetic field strength on the quality of water purification from heavy metals by ferritization. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics*, 35. 4-10. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.35>
19. Pakhomov, D., Kochetov, G., & Yemchura, B. (2019) Wastewater treatment from chromium compounds with the organization of circulating water supply of enterprises. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic medicine*, 32. 15-23. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2019.32>
20. Hsing-Cheng, L., Juu-En, C., Pai-Haung, S., & Li-Choung, C. (2008).



Stabilization of copper sludge by high-temperature  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  synthesis process. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 504 – 509.

21. Kolodko, A., Kochetov, G., Samchenko, D., & Pasko, A. (2016) Study of the stability of

industrial wastewater treatment waste in alkaline cements. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics*, 28. 180-186. [in Ukrainian]

### **Ferritative wastewater treatment from chromium (VI) compounds using electromagnetic pulse activation**

*Dmitry Pakhomov, Gennadii Kochetov, Dmitry Samchenko*

**Abstract.** Issues related to the prospects of implementing the latest technologies aimed at achieving energy efficiency in the field of water supply, resource conservation in material-intensive processes at industrial enterprises and prevention of environmental pollution are considered. A study of ferritative wastewater treatment from chromium compounds, which belong to the first class of danger. The efficiency of thermal and electromagnetic pulse activation of the process is compared. Appropriate experimental setups were developed and the main parameters of the purification process were studied and determined: the ratio of iron (II) and chromium (VI) ions, magnetic field strength, frequency of electromagnetic pulses, ferritization process duration, temperature and pH of the reaction mixture.

The expediency of using electromagnetic pulse activation of the reaction mixture by passing electromagnetic pulses through the reaction mixture has been studied and scientifically substantiated. Rational values of the strength and frequency of the electromagnetic field when using this method of activation, which are 0.01 - 0.14 Tl and 1 Hz, respectively, as well as the ratio of concentrations of heavy metal ions  $\text{Fe}^{2+} / \text{Cr}^{6+} = 10/1$  for washing water chrome plating line . It is shown that purified water meets the requirements of category 1 when reused in production. The results of X-ray diffraction analysis of ferritization sediments showed that stable crystalline phases, such as chromium ferrites and magnetite, are formed with increasing magnetic field strength. The chemical resistance of sludge allows them to be safely disposed of. It is established that this method of electromagnetic pulse activation is not inferior to thermal, and the technical and economic calculations confirmed a significant reduction in industrial costs in its application.

**Key words:** wastewater treatment, ferritization, chromium, electromagnetic pulse activation.

*Стаття надійшла до редакції 02.12.2021*