

## ОЧИСТКА СТИЧНИХ ВОД ВІД СПОЛУК ХРОМУ З ОРГАНІЗАЦІЄЮ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ

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

<sup>1,2,3</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури  
31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup> аспірант, pahomov4444@i.ua, [orcid.org/0000-0002-4073-6085](https://orcid.org/0000-0002-4073-6085)

<sup>2</sup> докт. тех. наук, професор [gkochetov@gmail.com](mailto:gkochetov@gmail.com), [orcid.org/0000-0003-0041-7335](https://orcid.org/0000-0003-0041-7335)

<sup>3</sup> аспірант, [yemchura.b.m@gmail.com](mailto:yemchura.b.m@gmail.com), [orcid.org/0000-0001-8079-3407](https://orcid.org/0000-0001-8079-3407)

DOI: 10.32347/2524-0021.2019.32.15-23

**Анотація.** Стічні води гальванічних виробництв є небезпечним техногенним забруднювачем навколишнього середовища. Тому розвиток сучасного суспільства вимагає застосування ефективних ресурсозберігаючих технологій їх очистки з метою збереження довкілля. Особлива увага наразі приділяється комплексній переробці промислових стічних вод від високотоксичних сполук хрому на сучасних промислових підприємствах. Досліджено переробку стічних вод лінії хромування гальванічних виробництв методом феритизації, який забезпечує як належний ступінь їх очистки, так і подальшу утилізацію відходів очищення води. Розроблено експериментальний ферит-реактор. Визначено вплив на процес комплексної очистки промивних стічних вод методом феритизації одного з головних чинників, який визначає перебіг процесу – співвідношення вихідних концентрацій іонів хрому і феруму. Показано, що очищена феритним методом промивна вода, яка містить 50 мг/л сполук хрому, має високий ступінь очистки води від сполук важких металів (> 99,5%) і відповідає вимогам повторного використання на виробництві. Виконано дослідження фазового складу осадів очистки води рентгенографічним методом. Показано, що практично нерозчинний і хімічно стійкий осад має кристалічну структуру і феромагнітні властивості при співвідношеннях Fe/Cr в інтервалі 8:1 – 15:1. Такі відходи водоочистки прийнятні до утилізації, що дозволяє уникнути втрат цінного та водночас токсичного металу – хрому. Розроблена очистка стічних вод запобігає забрудненню навколишнього середовища, забезпечує ефективне і раціональне використання сировини в системі гальванічного виробництва.

**Ключові слова:** феритизація, оборотне водопостачання, сполуки хрому, осад.

### ВСТУП

Стічні води гальванічних виробництв містять токсичні іони важких металів – заліза, міді, цинку, хрому, нікелю та ін. [1]. Потрапляння у водойми без належного ступеня очистки небезпечних для довкілля стічних вод, як розбавлених (промивних), так і концентрованих призводить до порушень природних біологічних процесів та зниження якості природних вод. Це, в свою чергу, погіршує здоров'я людей, а також наносить економічні збитки країні за рахунок втрати

цінних кольорових металів [2]. На даний момент в Україні діють більш ніж 3000 гальванічних підприємств. Орієнтовний об'єм стічних вод в цих виробництвах 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% [3]. Тому підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження високоефективного очисного обладнання, розробка маловідходних енергоефективних технологій із замкненими системами ресурсообігу є пріори-

тетним напрямком розвитку українських промислових підприємств [4, 5].

### АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Очистці води від сполук шестивалентного хрому на сучасних промислових підприємствах приділяється особлива увага, оскільки вони відносяться до першого класу небезпеки [6]. Токсичність хрому (VI) проявляється в пригніченні росту, гальмуванні метаболічних процесів, крім того, сполуки хрому відносяться до групи високого канцерогенного ризику. Як правило реагентна очистка стічних вод, які містять сполуки шестивалентного хрому зазвичай здійснюється в дві стадії. На першій – відбувається хімічне відновлення шестивалентного хрому в тривалентний менш токсичний хром (III); на другій – його осадження, як правило, у вигляді гідроксиду хрому (III) [7]. В результаті із недостатньо очищеними гальваностоками в природні водні об'єкти України щороку потрапляє суттєва кількість високотоксичного, і водночас цінного металу – хрому, що призводить до значних економічних збитків. Використання великих доз реагентів унеможлиблює їх використання стічних вод в системах оборотного водопостачання підприємств. Об'ємні осади, які утворюються в результаті реагентної очистки стічних вод, погано зневоднюються і утилізацію. Тому, розробка комплексної ресурсозберігаючої переробки стічних вод, які містять сполуки хрому, є перспективним напрямком вдосконалення екобезпеки гальванічних виробництв.

Як свідчать наші попередні дослідження та літературні дані інших фахівців саме такими є технології з використанням феритних наноматеріалів, які отримані методом феритизації та електроерозійного диспергування [8].

Для швидкого видалення зі стічних вод іонів важких металів також розроблен спосіб використання порошкового нанодиспергованого магнетиту [9]. Ма-

гнетит не токсичний, не вибухонебезпечний, не створює хімічних комплексних сполук, при зберіганні та транспортуванні впродовж довгого часу не втрачає своїх сорбційних та коагуляційних властивостей.

Перспективним також є застосування феритизаційної очистка стічних вод лінії хромування [9], оскільки ці стічні води які одночасно містять сполуки хрому і феруму. Використання цього методу дозволяє отримати практично нерозчинний осад внаслідок співосадження іонів хрому та заліза лужним реагентом. При цьому досягається утворення упорядкованої кристалічної структури феритного осаду, який містить сполуки хрому (III).

Використання цих методів дозволяє забезпечити як високий ступінь очистки води, так і отримати стійкий феромагнітний осад. Такий осад придатний до подальшої екологічно безпечної утилізації у виробництві матеріалів різного призначення, а в разі неможливості виготовлення товарної продукції – надійного захоронення на відкритих звалищах.

В наших попередніх роботах вивчалась переробка стічних вод ділянок нікелювання, міднення, цинкування [9]. Результати проведених досліджень свідчать про те, що головними чинниками, які визначають перебіг процесу феритизації, є значення рН, концентрації компонентів розчину, температури процесу, співвідношення концентрацій іонів заліза та хрому [10].

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

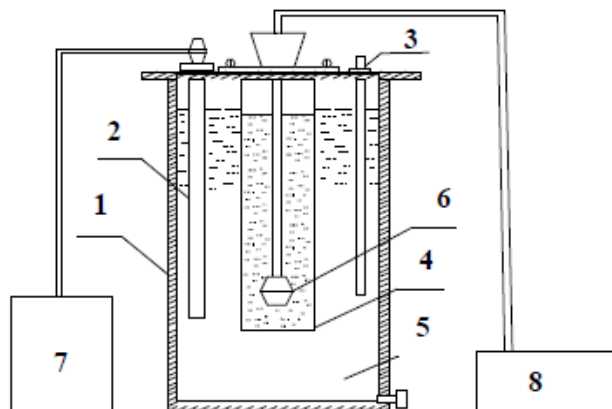
Метою цієї роботи є проведення експериментальних досліджень з визначення впливу одного з головних чинників процесу феритизації, а саме – співвідношення вихідних концентрацій іонів хрому і феруму на якість очистки промислових стічних вод гальванічних виробництв методом феритизації.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження використовувалися модельні розчини, які за своїм складом відповідають промивній стічній воді лі-

нії хромування. Ця вода містить від 20 до 100 мг/л іонів  $\text{Cr}^{6+}$ .

Солі феруму  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  і хрому  $\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  марки «х.ч.» розчиняли у дистильованій воді. Процес феритизації проводився на установці (рис. 1).



**Рис. 1.** Лабораторний ферит-реактор. 1 – корпус термостата; 2 – трубчатий нагрівальний елемент (ТЕН); 3 – термометр; 4 – циліндр з розчином; 5 – вода; 6 – аератор; 7 – реостат РПШ; 8 – компресорна установка

**Fig. 1.** Laboratory ferrite reactor. 1 – thermostat case; 2 – heating element; 3 – thermometer; 4 – a cylinder with a solution; 5 – water; 6 – aerator; 7 – rheostat; 8 – compressor

Шість серій дослідів виконувались при наступних параметрах: змінному співвідношенні концентрацій  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{6+}$  – 4; 6; 8; 10; 12; 15. Інші параметри проведення процесу залишались незмінними:  $\text{pH} = 9,5$ ;  $T = 70^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 15$  хв. Для коригування  $\text{pH}$  реакційної суміші додавався 10% розчин  $\text{NaOH}$ . Отриманий осад після феритизації ущільнювався протягом доби в звичайних умовах. Якість обробки стічних вод визначали за ступенем очистки:

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

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

Значення  $\text{pH}$  розчину вимірювався мілівольтметром  $\text{pH-150 MA}$ . Залишкові концентрації іонів заліза та хрому в очищеній стічній воді визначали на

атомно-абсорбційному полум'яному спектрофотометрі «Сатурн-2».

Структурний аналіз отриманих осадів проводили методом порошкової рентгенівської дифракції у  $\text{Cu-K}\alpha$  випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3М в діапазоні кутів  $2\theta$  від  $20^\circ$  до  $90^\circ$ . Порошкові дифрактограми розшифровували за допомогою довідкових карт ICSD PDF2+ – 2003 (The International Centre for Diffraction Data) та програмного забезпечення Match V.1.9a (Crystal Impact). Осад ущільнювався на центрифугі ОПн-8 при факторі розділення ( $\text{Фр}$ ) 900 протягом 2 хв, частота обертання – 3000 об/хв.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В табл. 1 наведені результати досліджень впливу зміни співвідношення

концентрацій іонів (Z) в вихідному розчині на залишкову концентрацію іонів хрому та заліза в очищеній воді. Як видно із даних цієї таблиці, із підвищенням співвідношення Z відбувається поступове зменшення залишкової концентрації як заліза, так і хрому. Результати серій дослідів №3-6, при співвідношеннях іо-

нів ферум/хром 8:1, 10:1, 12:1, 15:1 свідчать про те, що очищена воду можна використовувати в оборотній системі водопостачання гальванічних виробництв для операцій промивання деталей і для приготування електролітів відповідно до ГОСТ-ів 9.314-90 та 9.314-90.

**Табл. 1.** Результати очистки модельних розчинів стічних вод  
**Table 1.** Results of purification of model solutions of sewage

№ серії дослідів	Співвідношення Z	Концентрація, мг/л											Ступінь очистки, %	
		До очистки		Після очистки			ГДК для води гальванічного виробництва згідно ГОСТ 9.314							
		Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	1 категорія			2 категорія			Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>
							Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>		
1	4:1	200	50	0,92	0,27	-	0,3	5	-	0,1	1,0	-	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

В процесі феритизації у розчині формувалась чорна дисперсна суспензія з подальшим утворенням кристалічних щільних осадів. В табл.1 наведені результати досліджень, з яких видно як зміна співвідношення Z може впливати на об'єм отриманих осадів в досліджуваних зразках. Як можна побачити з даних табл.2 при Z (8:1), (10:1), (12:1), (15:1) утворюються достатньо щільні осадки, які після висушування мають чорне забарвлення. Треба зазначити, що при зменшенні Z (6:1) уповільнюється процес осадження, а висушений осад має чорно-коричневе забарвлення. Як свідчать дані табл. 1, об'єм кристалічних осадів, які отримані при феритній очистці води в 1,5...2 рази менший в порівнянні з осадами звичайної реагентної очистки [11].

Результати якісного фазового аналізу зразка осаду з вихідним співвідношенням  $Fe^{2+}/Cr^{6+} = 12/1$  представлені на рис. 2. Структурні дослідження отриманого в процесі феритизації осаду свідчать про високу кристалічність зразка: на рентгенівській дифрактограмі виявлені інтенсивні вузькі піки в області кутів  $2\theta$  від  $18^\circ$  до  $63^\circ$ . Ідентифікація фаз цього зразка показала, що осад складається з хромату феруму ( $FeCr_2O_4$ ) та магнетиту ( $Fe_3O_4$ ). Виявлені фази мають феромагнітні властивості, кристалічну решітку шпінелі; вони практично нерозчинні у воді, в лужному та слабо кислому середовищі [12]. За піками в презиційній області, було визначено параметри кристалічної ґратки, які наведені в табл.3.

**Табл. 2.** Залежність об'єму осаду  $V_{ос}$  від співвідношення  $Z$  іонів заліза і хрому  
**Table. 2.** Dependence of sediment volume on the ratio of iron and chromium ions

№ серії дослідів	Співвідношення $Z$	Концентрація Cr, мг/л	pH	$V_{ос}$ , %
1	4:1	50	9,5	30
2	6:1			40
3	8:1			45
4	10:1			50
5	12:1			75
6	15:1			80

**Табл. 3.** Параметри кристалічної ґратки осаду процесу феритизації при вихідному співвідношенні  $Fe^{2+}/Cr^{6+} = 12/1$

**Table. 3.** Parameters of the crystal lattice of sediment, obtaining at initial ratio  $Fe^{2+}/Cr^{6+} = 12/1$  in ferritization process

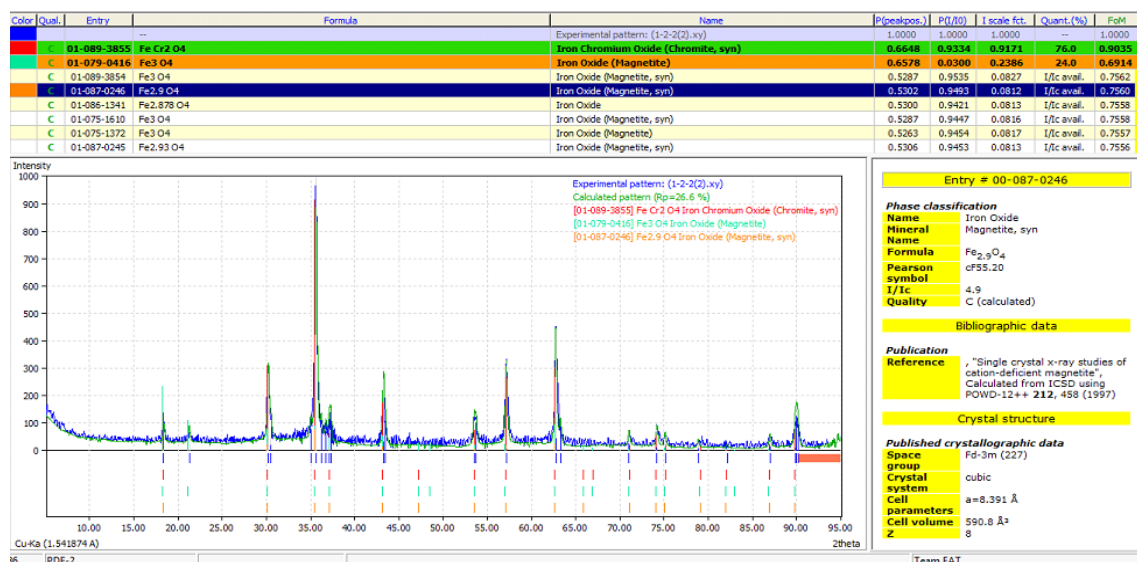
Назва фази	Хромат заліза	Магнетит
Формула	$FeCr_2O_4$	$Fe_3O_4$
Просторова група	Fd-3m (227)	F-43m (216)
Кристаліна ґратка	кубічна	кубічна
Параметри елементарної комірки	$a=8.39 \text{ \AA}$	$a=8.3941 \text{ \AA}$

Якість очищеної води за запропонованою нами методикою очистки стічних вод гальванічних виробництв від сполук хрому порівнювалась з іншими методами. Як видно із табл. 4, переробка стічних вод, які містять сполуки хрому, методом феритизації забезпечує високий ступінь очистки води від сполук важких металів, а саме (99,46 – 99,96%), і за цим показником переважають інші методи [13-20].

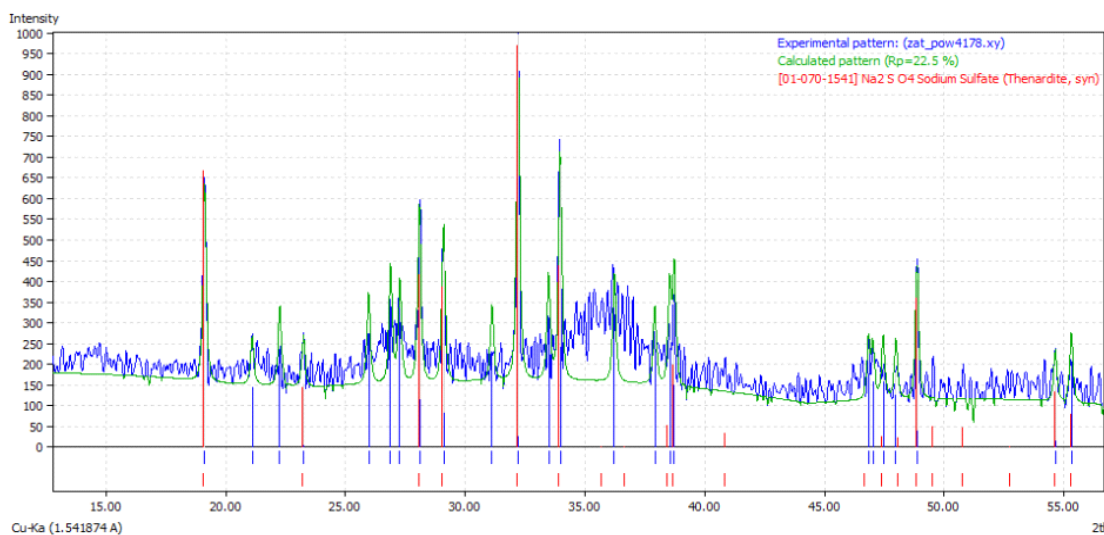
### ВИСНОВКИ

Досліджено вплив співвідношення концентрацій іонів  $Fe^{2+}$  і  $Cr^{6+}$  на процес очистки стічних вод гальванічних виробництв феритизацією. В результаті проведених нами дослідів, показано, що промивна вода гальванічних виробництв, яка містить 50 мг/л іонів  $Cr^{3+}$ ,

оброблена феритним методом має ступінь очистки більш ніж 99,5% і відповідає вимогам 1-ї категорії повторного використання на виробництві. Це дає можливість удосконалення оборотної системи водопостачання на вітчизняних промислових підприємствах. Дослідження осаду водоочистки рентгенографічним методом показало, що він має шпінельну структуру з феромагнітними властивостями. Це дозволяє легко відділити осад на магнітних фільтрах. Крім того, рентгенографічні дослідження засвідчили, що вилучення хрому зі стічної води відбувається не тільки за рахунок сорбції іонів  $Cr^{3+}$  поверхнею феритних структур, а також і завдяки утворенню хімічно стійкої сполуки – хроміту феруму ( $FeCr_2O_4$ ).



a)



b)

Рис. 2. Дифрактограма (а) та фазовий склад (б) осаду, який отримано при вихідному співвідношенні Fe<sup>2+</sup>/ Cr<sup>6+</sup> =12/1

Fig.2. The diffraction pattern (a) and phase composition (b) of the precipitate obtained from the initial ratio Fe<sup>2+</sup>/ Cr<sup>6+</sup> =12/1

Табл. 4. Порівняльна характеристика методів очищення стічних вод від сполук хрому  
 Table. 4. Comparative characterization of chromium wastewater treatment methods

№ п/п	Метод	Ступінь очищення, %	
		Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>
1	Реагентний (вапняне молоко)	94 – 96	96
2	Електрофлотажія	98 - 99,3	98
3	Гальванокоагуляція	96 – 98	99
4	Адсорбція		
	- на природнім вугіллі ( Б-1 )	-	62 – 67
	- на антрациті ( А-1 )	-	65
	- на дерев'яному вугіллі ( БАУ )	70	96 – 98
5	Біологічний	90	50 – 90
6	Феритизація	99,5 – 99,9	99,46 – 99,96

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Долина Л. Ф.** Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: Монография. Дн-вск.: Континент, 2008. 254 с.
2. **Тугай А. М., Кочетов Г. М., Самченко Д. М.** Вивчення стійкості відходів очищення стічних вод, які містять сполуки міді // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2012. Вип. 20. С. 66-70.
3. **Семенов В. В., Варламова С. И., Климов Е. С.** Очистка гальваностоків с использованием отходов производства // ЭЖИПР, 2005, № 9, С. 32-34.
4. **Кочетов Г. М.** Розробка системи очищення промивних вод гальванічних виробництв // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2008. Вип. 10. С. 73-78.
5. **Rubanov Yu. K., Tokach Yu. E., Nechaev A. F., Ognev M. N.** The galvanic productions waste waters and sludges processing with the heavy metals ions extraction // European Journal of Natural History, 2009. Vol. 6. P. 79 – 80.
6. **Кочетов Г. М., Олександренко О. П.** Удосконалення очищення відпрацьованих електролітів хромування методом феритизації // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2016. Вип. 27. С. 210–207.
7. **Науменко І. В., Кочетов Г. М., Іщенко М. В.** Ресурсоощадна переробка рідких відходів, які містять цинк, феритним методом // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. 2014. Вип. 22. С. 119–125.
8. **Singh P., Payal R. S., Srivastava R. C., Agrawal H. M., Chand P., Tripathi A., Tripathi R. P.** Effect of thermal treatment on the magnetic properties of nanostructured zinc ferrite // Journal of Physics: Conference Series. 2010. № 217.
9. **Ємчура Б., Кочетов Г., Самченко Д.** Феритна очистка стічних вод від іонів цинку: вплив швидкості аерації // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2018. Вип. 30. С. 14–22.
10. **Fu, F., Qi, W.** Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review // J. Environ. Manag, 2011. 92(3), P. 407 – 418.
11. **Tu, Y. J., Chang, C. K., You, C. F., Wang, S. L.** Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process // J. Hazard. Mater, 2012. 209, P. 379–384.
12. **Heuss-Aßbichler S., John M., Klapper D., Bläß U. W., Kochetov G.** Recovery of copper as zero-valent phase and/or copper oxide nanoparticles from wastewater by ferritization // Journal of Environmental Management, 2016. P. 1 – 7.
13. **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), P. 504 – 509.
14. **Monastyrov M., Prikhna T., Halbedel B., Kochetov G., Marquis F., Mamalis A., Prysiazhna O.** Electroerosion dispersion, sorption and coagulation for complex water purification: electroerosion waste recycling and manufacturing of metals, oxides and alloys nanopowders // Nanotechnology Perceptions. 2019. 15. P. 48–57.
15. **Cornell, R. M., Schwertmann, U.** The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Use. Wiley-VCH. 2003.
16. **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.
17. **Kochetov G. M., Samchenko D. M., Kolodko A. O., Kovalchuk O. Yu., Pasko A. V.** Development of technology of industrial wastes treatment products utilization by ferritization in the matrix of alkali activated cement // Technology audit and production reserves, 2018. 3/6 (44). P. 28-45.
18. **Kochetov G., Prikhna T., Kovalchuk O., Samchenko D.** Research of the treatment of depleted Nickel-plating electrolytes by the ferritization method // East-European journal of enterprise technologies, 2018. 93, P. 54–59.
19. **Gunjakar J. L., More A. M., Gurav K. V., Lokhande C. D.** Chemical synthesis of spinel nickel ferrite (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nano-sheets. App Surf Sci. 2008. Vol. 254. P. 5844 – 5848.
20. **Kryvenko P., Cao H., Petropavlovskiy O., Weng L., Kovalchuk O.** Applicability of alkaliactivated cement for immobilization of lowlevel radioactive waste in ion-exchange resins // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 1, Issue. 6. P. 40 – 45.
21. **Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A.** Utilization of industrial waste water treatment residues in alkali activated cement and concretes // Key Engineering materials. 2017. Vol. 761. P.35 – 38.

REFERENCES

1. **Dolina, L. F. (2008).** *Modern equipment and technologies for wastewater treatment from salts of heavy metals*: Monograph. Day-Sun: Continent. [in Russian]
2. **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, Sewerage and Hydraulic.* 20. 66-70. [in Ukrainian]
3. **Semenov, V. V., Varlamova, S. I., & Klimov E. S. (2005).** Cleaning galvanic drains using industrial waste. *EkiPR.* 9. 32-34. [in Russian]
4. **Kochetov, G. M. (2008).** Development of a system of cleaning of washing waters of electroplating manufactures. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic.* 10. 73-78. [in Ukrainian]
5. **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. Retrieved from <https://world-science.ru/en/article/view?id=20487>
6. **Kochetov, G., & Oleksandrenko, O. (2016).** Improvement of the purification of spent electrolytes by chromatating by ferritization. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic.* 27. 210-207. [in Ukrainian]
7. **Naumenko, I., Kochetov, G., & Ischchenko, N. (2014).** Resource-saving processing of liquid wastes containing zinc, ferrite method. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic.* 22. 119-125. [in Ukrainian]
8. **Singh, P., Payal, R. S., Srivastava, R. C., Agrawal, H. M., Chand, Prem, Tripathi, Amita, & Tripathi, R. P. (2010).** Effect of thermal treatment on the magnetic properties of nanostructured zinc ferrite. *Journal of Physics: Conference Series.* 217. doi:10.1088/1742-6596/217/1/012108
9. **Yemchura, B., Kochetov, G., & Samchenko, D. (2018).** Ferrite sewage treatment of zinc ions: effect of aeration rate. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic.* 30. 14-22. doi:10.32347/2524-0021.2018.30.14-22
10. **Fu, F., & Qi, W. (2011).** Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J. Environ. Manag.* 92 (3), 407-418. doi:10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
11. **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 *J. Hazard. Mater.* 209, 379–384. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.01.050
12. **Heuss-Abbichler, S., John, M., Klapper, D., Bläß, U. W., & Kochetov, G.. (2016).** Recovery of copper as zero-valent phase and/or copper oxide nanoparticles from wastewater by ferritization *Journal of Environmental Management.* 1-7. doi:10.1016/j.jenvman.2016.05.053
13. **Hsing-Cheng, L., Juu-En, C., Pai-Haung, S., & Li-Choung, C. (2008).** Stabilization of copper sludge by high-temperature CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> synthesis process. *Journal of Hazardous Materials.* 150 (3). 504-509. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.04.130.
14. **Monastyrov, M., Prikhna, T., Halbedel, B., Kochetov, G., Marquis, F., Mamalis, A., & Prysiashna, O. (2019).** Electroerosion dispersion, sorption and coagulation for complex water purification: electroerosion waste recycling and manufacturing of metals, oxides and alloys nanopowders. *Nanotechnology Perceptions.* 15 (1). 48–57. doi:10.4024/n24mo18a.ntp.15.01
15. **Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003).** *The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Use.* Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/3527602097
16. **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 Hydraulic.* 28. 180-186. [in Ukrainian]
17. **Kochetov, G. M., Samchenko, D. M., Kolodko, A. O., Kovalchuk, O. Yu., & Pasko, A. V. (2018).** Development of technology of industrial wastes treatment products utilization by ferritization in the matrix of alkali activated cement. *Technology audit and production reserves.* 6. 3(44). 28-45. doi:10.15587/2312-8372.2018.152615
18. **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. doi:10.15587/1729-4061.2018.133797

19. **Gunjakar, J. L., More, A. M., Gurav, K. V., & Lokhande, C. D. (2008).** Chemical synthesis of spinel nickel ferrite (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nano-sheets. *App Surf Sci.* 254. 5844 – 5848. doi:10.1016/j.apsusc.2008.03.065

20. **Kryvenko, P., Cao, H., Petropavlovskiy, O., Weng, L., & Kovalchuk, O. (2016).** Applicability of alkaliactivated cement for immobilization of lowlevel radioactive waste in

ion-exchange resins. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies.* 1 (6).40-45. doi:10.15587/1729-4061.2016.59489.

21. **Krivenko, P., Kovalchuk, O., & Pasko, A. (2017).** Utilization of industrial waste water treatment residues in alkali activated cement and concretes. *Key Engineering materials.* 761. 35-38.

doi:10.4028/www.scientific.net/kem.761.35

## **Cleaning of waste water from chrome compounds with organization of reverse water supply of enterprises**

*Dmitro Pakhomov, Gennady Kochetov, Bogdan Yemchura*

**Abstract.** Wastewater from galvanic industries is a dangerous man-made pollutant in the environment. Therefore, the development of modern society requires the use of effective resource-saving technologies for their cleaning in order to preserve the environment. Particular attention is currently being paid to the integrated treatment of industrial wastewater from highly toxic chromium compounds in modern industrial plants. Wastewater treatment of the chromium plating line was investigated by ferritization method, which provides both the proper degree of their purification and the subsequent utilization of the water purification waste. An experimental ferrite reactor has been developed. The influence on the process of complex wastewater treatment by the method of ferritization of one of the main factors that determines the course of the process - the ratio of the initial concentrations of chromium and ferric ions. It was shown that the ferrite purified water containing 50 mg/l of chromium compounds has a high degree of purification of water from heavy metal compounds (> 99.5%) and meets the requirements of reuse in production. Investigation of the phase composition of sediments of water purification by radiographic method. It is shown that practically insoluble and chemically stable sediment has a crystalline structure and ferromagnetic properties at the Fe/Cr ratio in the range 8:1 – 15:1. Such waste water treatment is acceptable for disposal, which avoids the loss of valuable and at the same time toxic metal – chromium. The development of sewage treatment prevents pollution of the environment, ensures efficient and rational use of raw materials in the galvanic production system.

**Keywords:** ferritization, circulating water supply, chromium compounds, sediment.

*Стаття надійшла до редакції 25.11.2019*