

УДК 628.4

**Bogdan Yemchura**<sup>1</sup>, Postgraduate student

ORCID ID 0000-0001-8079-3407 *e-mail*: yemchura.b.m@gmail.com

**Gennadii Kochetov**<sup>1</sup>, D. S. (Engineering), Professor

ORCID ID 0000-0003-0041-7335 *e-mail*: gkochetov@gmail.com

**Aleksey Vasiliev**<sup>2</sup>, Dr., Professor

ORCID ID 0000-0003-2687-0672 *e-mail*: vasiliev@etsu.edu

**Dmitry Samchenko**<sup>1</sup>, PhD, Senior Scientist

ORCID ID 0000-0003-3305-8180 *e-mail*: sama30071988@gmail.com

<sup>1</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> East Tennessee State University, Johnson City, USA

## ENERGY-SAVING PROCESSING OF GALVANIC SLUDGE BY THE FERRITIZATION METHOD

**Abstract.** *Increasing the level of ecological safety for industrial facilities through the implementation of resource-saving technology for the processing of toxic waste – galvanic sludge by ferritization method is considered. Advantages of using electromagnetic pulse activation method of ferritization process in comparison with traditional thermal one are experimentally confirmed. It is recommended to use electromagnetic pulse discharges with magnetic induction amplitude of 0.298 T and pulse rate of 0.5 to 10 Hz to activate the ferritization process. This method of activation ensures a high degree of recovery of heavy metal ions – up to 99.97% and the reuse of purified water in industrial facilities. The regularities of removal of heavy metals by ferritization in the range of aeration rate values  $0.225 \div 0.075 \text{ m}^3/\text{h}$  in the reacton mixture under different activation methods are established. Investigated the physical properties and structure of sediments, obtained by ferritization method. Environment friendly ferrite precipitates are characterized by a high degree of centrifuge seal (more than 90%) and a crystalline structure with the maximum content of ferrite phases with magnetic properties. The method of electromagnetic impulse activation also has undeniable energy advantages in comparison with traditional high-temperature one: electricity costs are reduced more than 60%. In addition, reducing the aeration rate to  $0.075 \text{ m}^3/\text{h}$  makes it possible to additional cost reduction for the proposed technology. The immobilization of heavy metals in environmentally safe ferrite sludge enables further disposal of waste in commodity products. The proposed process of galvanic waste processing by improvement of ferritization method prevents environmental pollution, ensures efficient and rational use of water, raw materials and energy in the galvanic industry.*

**Keywords:** *galvanic sludge; heavy metal ions; ferritization; electromagnetic pulse*

---

© Б. Ємчура, Г. Кочетов, А. Васильєв, Д. Самченко, 2020

**Б. Ємчура<sup>1</sup>, Г. Кочетов<sup>1</sup>, А. Васильєв<sup>2</sup>, Д. Самченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Державний університет Східного Теннессі, Джонсон-Сіті, США

## **ЕНЕРГООЩАДНА ПЕРЕРобКА ГАЛЬВАНІЧНИХ ШЛАМІВ ФЕРИТИЗАЦІЙНИМ МЕТОДОМ**

***Анотація.** Розглянуто перспективу підвищення рівня екологічної безпеки промислових підприємств шляхом реалізації ресурсозберігаючої технології переробки токсичних відходів – гальванічних шламів – методом феритизації. Експериментально підтверджено переваги застосування електромагнітного імпульсного методу активації процесу феритизації в порівнянні з традиційним термічним. Рекомендується використання електромагнітних імпульсних розрядів з амплітудою магнітної індукції 0,298 Тл та частотою імпульсів від 0,5 до 10 Гц для проведення активації процесу. Такий спосіб активації забезпечує високий ступінь вилучення іонів важких металів – 99,97% та повторне використання очищеної води на виробництві. Встановлені закономірності феритизаційного вилучення важких металів в діапазоні значень реакційної швидкості аерації суміші  $0,225 \div 0,075$  м<sup>3</sup>/год при різних способах активації. Досліджено фізичні властивості та структуру осадів феритизації. Екологічно безпечні феритизаційні осади характеризуються високим ступенем ущільнення на центрифугі (більш ніж 90%) та кристалічною структурою з максимальним вмістом феритних фаз з магнітними властивостями. Метод електромагнітної імпульсної активації має також і незаперечні енергетичні переваги в порівнянні з традиційним високотемпературним: затрати електроенергії знижуються більш ніж на 60%. Крім того, зменшення швидкості аерації до 0,075 м<sup>3</sup>/год дає можливість додатково здешевити запропоновану технологію. Імобілізація важких металів у екологічно безпечні феритні осади дає можливість подальшої утилізації відходів в товарних продуктах. Запропонований процес переробки гальванічних відходів удосконаленим методом феритизації запобігає забрудненню навколишнього середовища, забезпечує ефективне і раціональне використання води, сировини та енергії в системі гальванічного виробництва.*

***Ключові слова:** гальванічні шлами; важкі метали; феритизація; електромагнітні імпульсні розряди*

### **Актуальність дослідження**

Забруднення води є одним з головних факторів ризику для здоров'я людини. Токсичні стічні води гальванічних виробництв, а також відходи очистки води становлять особливу небезпеку з огляду на високий вміст токсичних сполук важких металів. Традиційні методи очищення стічних вод гальванічних виробництв зводяться до їх переробки в малорозчинні гідроксиди важких металів [1]. З цих нестійких шламів легко вилуговуються іони важких металів у ґрунт та водні об'єкти, тим самим наносячи невідправну шкоду всій екосистемі [2]. В Україні щорічно накопичується у спеціально відведених місцях близько 2,3 млн тонн токсичних відходів кислот, лугів і солей, а також 1 млн тонн гальванічних шламів [3]. Тому на підприємствах повністю вичерпана можливість розміщення на власній території таких відходів. На теперішній час масштаби їх переробки та утилізації недостатні, а спеціальних

полігонів не вистачає. Ось чому проблема переробки гальванічних шламів з кожним роком набуває все більшого значення.

Перспективним методом переробки гальванічних шламів є метод феритизації [4]. Використання цього методу дозволяє отримати нешкідливі для довкілля стійкі сполуки феритів важких металів в результаті високотемпературної обробки розчинів лужним реагентом та киснем повітря. Крім того, цей метод забезпечує високий ступінь вилучення іонів важких металів з реакційної суміші [5].

Одним із важливих технологічних параметрів процесу феритизації є швидкість аерації реакційної суміші киснем повітря. Незважаючи на ряд публікацій в літературі [6–8], цей аспект феритизації залишається практично недослідженим. Аераційний процес може впливати як на техніко-економічну, так і екологічну ефективність феритних технологій.

Актуальним є також вдосконалення феритизаційної переробки гальванічних шламів шляхом використання енергоощадного електромагнітного імпульсного методу активації процесу феритизації [9].

**Метою цієї роботи** є експериментальні дослідження впливу швидкості аерації та способу активації реакційної суміші на ступінь вилучення іонів важких металів і фізико-хімічні властивості осадів феритизаційної переробки гальванічних шламів.

## Методика дослідження

Нами досліджувався згущений осад – гальванічний шлам, який є відходом реагентної очистки концентрованих стічних вод - відпрацьованих електролітів нікелювання, міднення і цинкування одного із промислових підприємств м. Києва. Переробка шламу, основні характеристики якого представлено в табл. 1, проводилась в дві стадії. На першій стадії осад розчинявся у відпрацьованому травильному розчині (табл. 2). Друга стадія переробки шламу – феритизація отриманого розчину [9].

Таблиця 1 – Основні характеристики гальванічного шламу нейтралізації

Вміст іонів важких металів, г/дм <sup>3</sup>				рН	Густина (ρ), г/см <sup>3</sup>	Вологість (W), %	Сухий залишок мг/дм <sup>3</sup>
Fe <sup>заг.</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>				
0,203	4,732	2,631	1,425	9,81	1,016	93,06	3040

Таблиця 2 – Основні характеристики відпрацьованого сірчано-кислотного травильного розчину

Матеріал травлення	Fe <sup>заг.</sup> , г/дм <sup>3</sup>	SO <sub>4</sub> , г/дм <sup>3</sup>	рН	Завислі речовини, г/дм <sup>3</sup>
Сталеві труби	46,6	79,89	1,45	0,35

Процес феритизації отриманої реакційної суміші проводився при оптимальних технологічних параметрах, які були нами визначені в [9]:

сумарна концентрація іонів важких металів  $C_{\Sigma} = 10,41 \text{ г/дм}^3$  ( $\text{Fe}_{\text{зар}} - 8,329$ ;  $\text{Ni}^{2+} - 1,122$ ;  $\text{Cu}^{2+} - 0,624$ ;  $\text{Zn}^{2+} - 0,337 \text{ г/дм}^3$ ); співвідношення концентрацій іонів  $[\text{Fe}_{\text{зар}}] / \Sigma([\text{Ni}^{2+}] + [\text{Cu}^{2+}] + [\text{Zn}^{2+}]) Z = 4/1$ ;  $\text{pH} = 10,5$ ; тривалість процесу  $\tau = 25 \text{ хв}$ . Швидкість аерації реакційної суміші змінювали в діапазоні  $0,225 \div 0,075 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Процес феритизації здійснювався як з термічним, так і електромагнітним імпульсним способом активації реакційної суміші. Для проведення дослідження використовували дві лабораторні установки з робочим об'ємом реактора  $1 \text{ дм}^3$ : з термічною активацією феритизаційного процесу при температурах до  $75^\circ\text{C}$  [10] та електромагнітною імпульсною активацією при температурі  $20^\circ\text{C}$  (рис. 1). Електромагнітний імпульсний спосіб активації мав раціональні режимні характеристики, які попередньо були визначені нами: амплітуду магнітної індукції  $0,298 \text{ Тл}$ ; частоту імпульсів від  $0,5$  до  $10 \text{ Гц}$ ; кількість пакетів імпульсів та імпульсів в пакеті  $4$  і  $10$ , відповідно; тривалість імпульсу від  $50$  до  $1000 \text{ мс}$ , інтервали між імпульсами від  $50$  до  $1000 \text{ мс}$ , між пакетами –  $10 \text{ с}$  [11, 12].

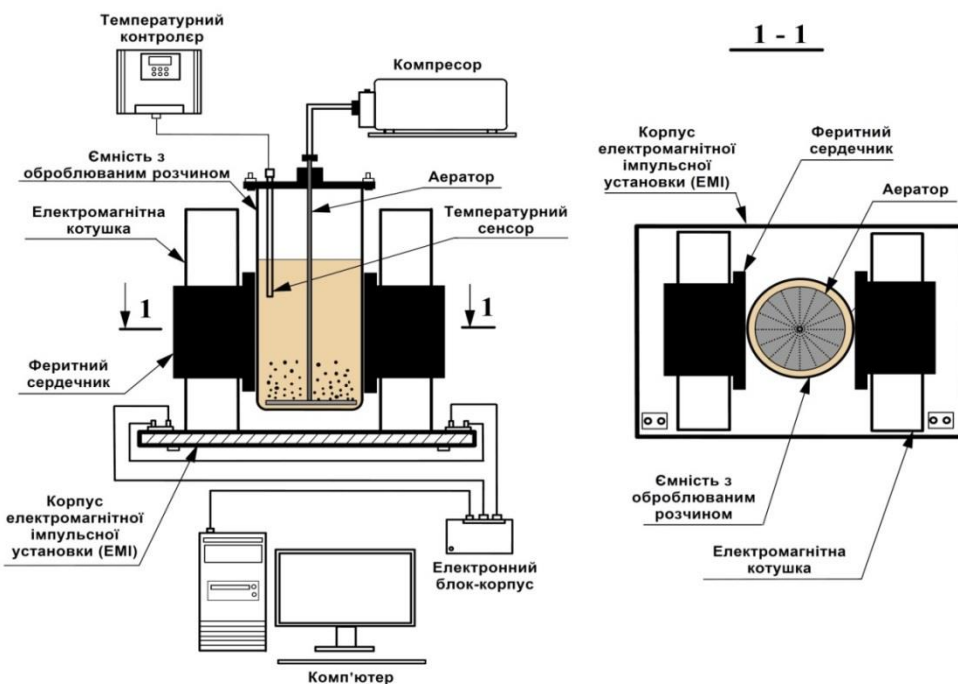


Рис. 1 – Принципова схема лабораторної установки переробки гальванічних відходів методом феритизації з електромагнітною імпульсною активацією

Залишкові концентрації іонів важких металів (феруму, нікелю, міді і цинку) після переробки гальванічних шламів методом феритизації визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі AAA-6800 (Shimadzu, Японія).

Об'єм ущільненого осаду після центрифугування – на обладнанні ОПН-8 (Дастам М, Росія) при факторі розділення (Фр)  $3600$  протягом  $2 \text{ хв}$ . Частота обертання ротора становила  $6000 \text{ об/хв}$ .

Індекс центрифугування  $U$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ , що характеризує вологовіддачу осаду, визначали за рівнянням:

$$U = V_k / C_o \cdot V_o , \quad (1)$$

де:  $C_o$  – концентрація твердої фази осаду,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$V_k = V_o - V_\phi$  – об'єм кека,  $\text{см}^3$ ;

$V_\phi$  – об'єм фугата,  $\text{см}^3$ ;

$V_o$  – об'єм осаду,  $\text{см}^3$ .

$C_o$  розраховували за формулою

$$C_o = \frac{(100 - W_o)}{100} \cdot \rho_o , \quad (2)$$

де:  $W_o$  – вологість вихідного осаду, %;

$\rho$  – густина вихідного осаду,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Структурний аналіз отриманих осадів проводили методом порошкової рентгенівської дифракції в покроковому режимі з  $\text{Cu} - \text{K}\alpha$  випромінюванням на дифрактометрі Ultima IV (Rigaku, Японія). Зйомка виконувалась в інтервалі кутів  $2\theta$  6 – 70° з кроком сканування 0,05°.

Для вивчення мікроструктури зразків осадів використовували скануючий електронний мікроскоп-аналізатор РЕММА-101А (SELMІ, Україна).

## Результати дослідження

Результати досліджень впливу швидкості аерації реакційної суміші киснем повітря на фізико-хімічні показники феритизації при різних способах активації процесу – термічному та електромагнітному імпульсному (ЕМІ) наведено на рис. 2. Отримані дані свідчать про те, що з підвищенням швидкості аерації незалежно від способу активації реакційної суміші збільшуються залишкові концентрації іонів важких металів в розчині. На нашу думку, це пов'язано з тим, що при різних швидкостях аерації в розчині можуть протікати проміжні твердофазні реакції, що в лужному середовищі призводить до збільшення концентрації іонів важких металів. Слід зазначити, що в дослідженому діапазоні швидкостей аерації значення залишкових концентрацій важких металів змінюються несуттєво і знаходяться в межах від 0,1 до 0,34  $\text{мг}/\text{дм}^3$ . Таким чином, в усіх проведених експериментах концентрації іонів важких металів не перевищують або відповідають нормам стандарту щодо 1-ї категорії води для гальванічних виробництв України. Використання електромагнітної імпульсної активації процесу феритизації при мінімальній дослідженій швидкості аерації 0,225  $\text{м}^3/\text{год}$  дозволяє додатково підвищити ефективність вилучення іонів важких металів з досягненням вимог стандарту 2-ї категорії води, яка використовується на гальванічному виробництві. При цьому також підвищується енергоефективність та екологічність феритизаційної технології переробки гальванічних відходів.

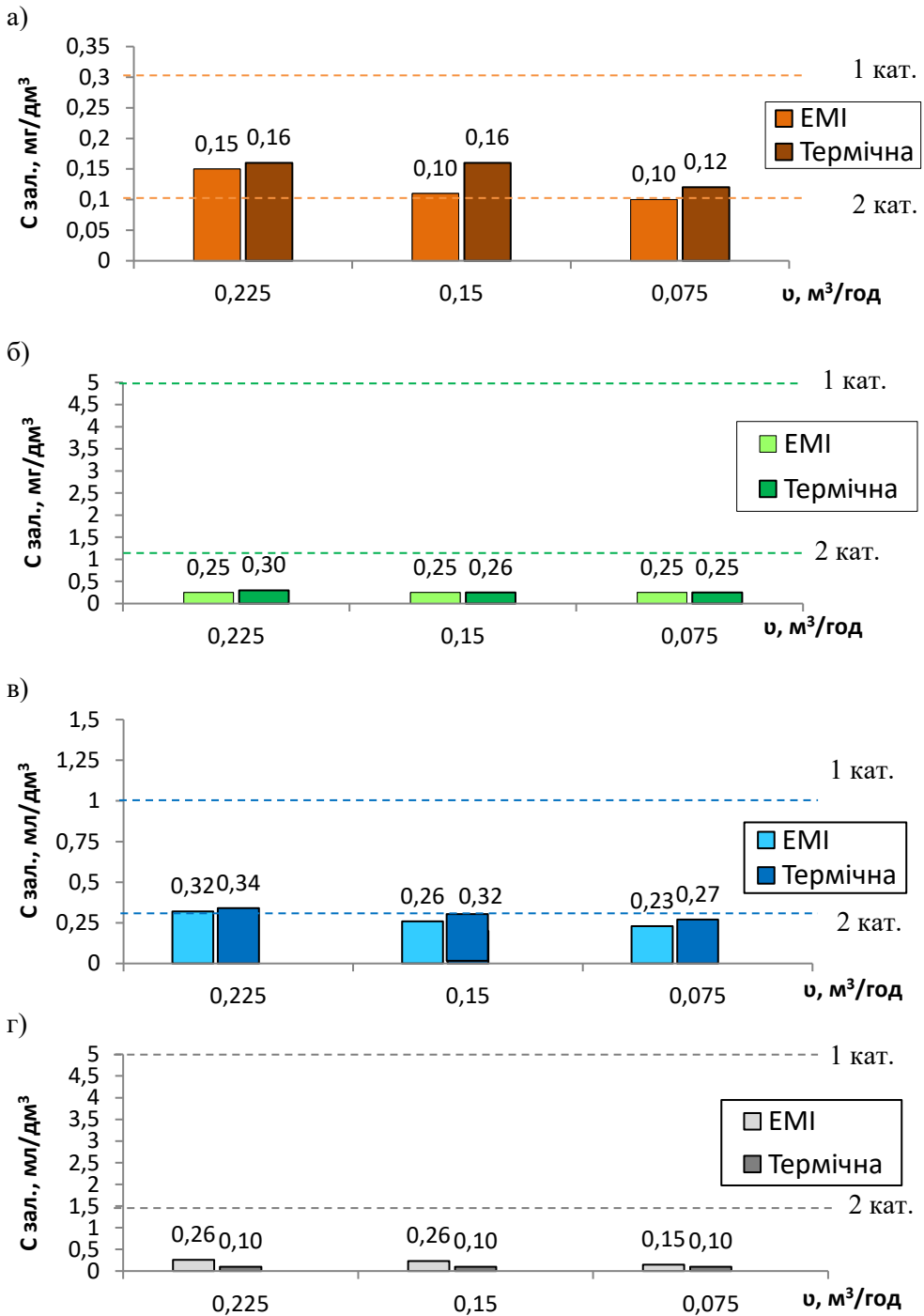


Рис. 2 – Вплив швидкості аерації ( $v$ ) реакційної суміші на залишкові концентрації іонів важких металів ( $C_{зал}$ ): а – феруму; б – нікелю; в – міді; г – цинку

Як свідчать дані, наведені в табл. 3, при низькій швидкості аерації  $v = 0,075 \text{ м}^3/\text{год}$  при використанні як термічного, так і електротермічного імпульсного способу активації процесу феритизації отриманий осад мас

високу ефективність ущільнення в процесі центрифугування. При цьому об'єм, вологість та індекс центрифугування зменшується, а саме :  $V_k$  – з 10,0 до 1,0  $\text{см}^3$ ;  $W_k$  – з 89,85 до 84,33%;  $U$  – з 13,70 до 7,61  $\text{г}/\text{см}^3$ . Слід зауважити, що активація водних розчинів електромагнітними імпульсними розрядами при високих швидкостях аерації менш ефективна, ніж високотемпературна. Отримані дані можна пояснити зміною фазового складу осаду феритизації при різних умовах проведення дослідів.

Таблиця 3 – Властивості осадів при різних швидкостях аерації реакційної суміші та способах активації процесу феритизації

№ серії дослідів	Спосіб активації процесу феритизації	Швидкість аерації ( $v$ ), $\text{м}^3/\text{год}$	Об'єм осаду ( $V_k$ ), $\text{см}^3$	Вологість осаду ( $W_k$ ), %	Густина осаду ( $\rho_k$ ), $\text{г}/\text{см}^3$	Індекс центрифугування ( $U$ ), $\text{г}/\text{см}^3$
F1	Термічний	0,225	1,4	86,54	1,197	10,66
F2		0,15	1,0	84,06	1,281	7,61
F3		0,075	1,0	83,73	1,290	7,61
F4	Електромагнітний імпульсний	0,225	1,8	89,85	1,169	13,70
F5		0,15	1,2	85,67	1,244	9,13
F6		0,075	1,0	84,33	1,279	7,61

На основі даних рентгенографічного аналізу (рис. 3 і табл. 4) встановлено фазовий склад зразків осадів при різних швидкісних режимах аерації реакційної суміші киснем повітря.

Процес окислення  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$  киснем повітря в присутності катіонів нікелю, міді і цинку проходить через стадію утворення проміжних сполук, які в кінцевому результаті перетворюються в стабільні оксидні фази, такі як магнетит та ферити нікелю, міді та цинку. Зміна фізико-хімічних умов процесу фазоутворення, зокрема режиму окиснення, може зміщувати перебіг зазначеного процесу в бік деструкції фаз оксидів з формуванням оксигідроксидів важких металів.

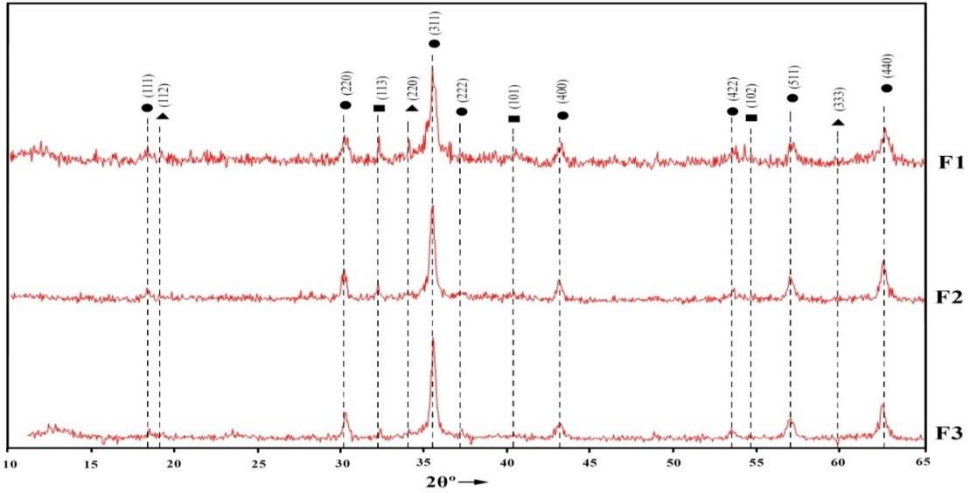
Результати експериментальних досліджень ущільнення осадів центрифугуванням та аналіз літературних джерел [13, 14] добре корелюють з даними структурних досліджень зразків осадів, які наведені на рис. 3 та в табл. 4.

Результати структурних досліджень осадів свідчать про високу їх кристалічність, за виключенням зразка F4. Інтенсивність піків цього зразка незначна, а рефлекси (311, 400, 511) – уширені. Рентгенограми інших досліджуваних зразків осадів майже ідентичні – вони мають високий ступінь кристалічності структури і різниця в інтенсивності рефлексів несуттєва.

З проведеного аналізу структуроутворення фаз можна припустити, що при швидкості аерації  $v = 0,075 \text{ м}^3/\text{год}$  в системі відбувається цілеспрямоване формування феритних фаз з високим ступенем кристалічної структури, про що свідчить висока інтенсивність піку (311). При підвищенні швидкості аерації від 0,15 до 0,225  $\text{м}^3/\text{год}$  відбувається часткове руйнування вже сформованих структурних фаз феритів  $\text{Fe}_2(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn})\text{O}_4$ . На наш погляд, швидке

постачання у систему кисню спричиняє окиснення, зокрема, фериту нікелю  $\text{Fe}_2\text{NiO}_4$  з утворенням фази нікелевого лимоніту  $(\text{FeNi})\text{O}(\text{OH})$ . Крім зазначених фаз, в структурі осаду також ідентифіковані піки сульфату натрію  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

а)



б)

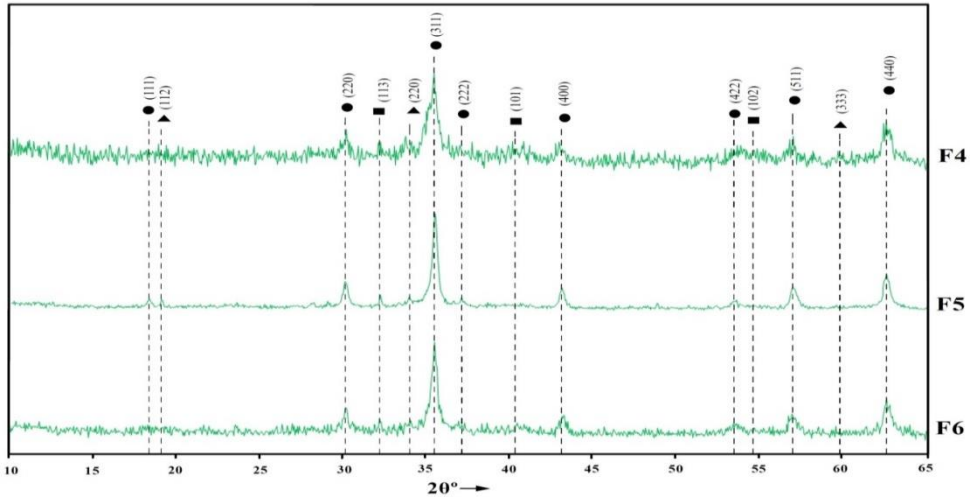


Рис. 3 – Дифрактограми зразків осадів: а) термічний спосіб активації (F1 ÷ F3); б) електромагнітний імпульсний спосіб активації (F4 ÷ F6)

● –  $(\text{Fe,Ni,Cu,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ ; ▲ –  $(\text{FeNi})\text{O}(\text{OH})$ ; ■ –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Результати кількісного фазового аналізу зразків (табл. 4) свідчать про те, що підвищення швидкості аерації реакційної суміші від 0,150 до 0,225  $\text{m}^3/\text{год}$  призводить до зменшення фази фериту металів  $\text{Fe}_2(\text{Fe, Ni, Cu, Zn})\text{O}_4$  в осадах: при термічному способі активації – на 6,2%, електромагнітному імпульсному – на 12,3%. Це, в свою чергу, сприяє збільшенню фаз нікелевого лимоніту  $(\text{FeNi})\text{O}(\text{OH})$  на 3,4% (термічна) і 5,4% (електромагнітна імпульсна активація) та сульфату натрію  $(\text{Na}_2\text{SO}_4)$  на 2,7% і 6,9%, відповідно.



Таблиця 4 – Кількісний фазовий склад осадів

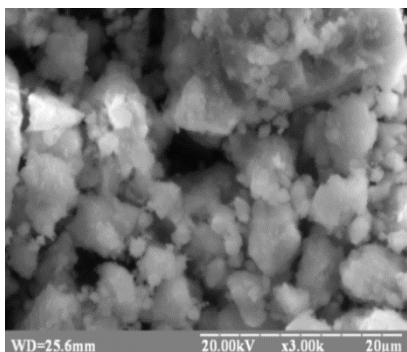
№ серії дослідів	Масова частка фази, %		
	(Fe,Ni,Cu,Zn)Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(FeNi)O(OH)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
F1	73,12	14,19	12,69
F2	77,19	11,24	11,57
F3	79,32	10,72	9,96
F4	65,73	17,39	16,88
F5	76,36	12,93	10,71
F6	78,11	11,98	9,91

Аналіз структурних досліджень (табл. 4) засвідчив, що зразки, які отримані при термічному (F3) та електромагнітному імпульсному (F6) способах активації, характеризуються максимальним вмістом фази феритів важких металів, який перевищує 78%. Ці зразки мають магнітні властивості.

Дані рентгенофазового аналізу зразків добре корелюють з результатами електронної мікроскопії осадів (рис. 5), які проводились для зразків серій F3 та F6.

Як видно з рис. 5, в процесі переробки рідких гальванічних відходів феритизацією при різних способах її активації формуються осадки з дисперсною структурою, які містять кристали неправильної форми в поровому просторі. Такі структури мають хорошу сорбційну здатність як до іонів важких металів, так і до органічних речовин, а отже, можуть успішно використовуватись для очищення промивних стічних вод промислових виробництв [15].

а)



б)

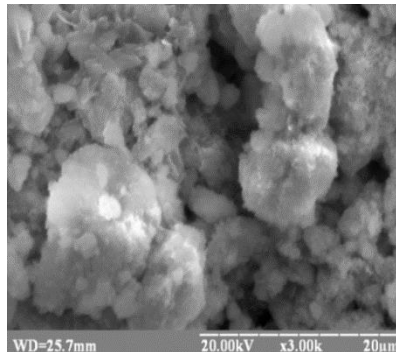


Рис. 5 – Мікрофотографії зразків осадів з термічною (а) та електромагнітною імпульсною (б) активацією; збільшення в  $\times 3000$  разів

Важлива перевага електромагнітного імпульсного способу активації – його енергоефективність в порівнянні з традиційною термічною. Нами виконано оцінку енергоємності процесу переробки гальваношламів при різних способах активації і швидкостей аерації процесу феритизації. Кількість споживаної електроенергії при переробці шламів залежить від технологічних стадій процесу: дозування, змішування, аерація, нагрів та центрифугування. В результаті проведених розрахунків встановлено, що електромагнітний

імпульсний спосіб активації процесу феритизації дає можливість на 60% зменшити витрати електроенергії в порівнянні з термічною активацією. Крім того, зниження швидкості аерації реакційної суміші в процесі феритизації з 0,225 до 0,075 м<sup>3</sup>/год дозволяє додатково заощадити до 10% електроенергії.

## **Висновки та перспективи подальших досліджень**

Таким чином, результати аналізу стану новітніх технологій переробки гальванічних шламів, а також проведені нами дослідження безумовно свідчать про перспективність застосування феритизаційного методу, завдяки його техніко-економічним та екологічним перевагам, в першу чергу у порівнянні з традиційним реагентним методом.

В результаті проведених досліджень встановлено ефективність застосування електромагнітних імпульсних розрядів для активації процесу феритизації з амплітудою магнітної індукції 0,298 Тл; частотою імпульсів від 0,5 до 10 Гц; кількістю пакетів імпульсів та імпульсів в пакеті 4 і 10, відповідно; тривалість імпульсу від 50 до 1000 мс, інтервали між імпульсами від 50 до 1000 мс, між пакетами 10 с. Експериментально вивчено вплив зміни швидкості аерації реакційної суміші на фізико-хімічні показники процесу феритизації при різних способах активації. Встановлено, що найкращі результати були досягнені із застосуванням електромагнітного імпульсного (Т = 20°C) та термічного (Т = 75°C) способів активації процесу феритизації при швидкості аерації – 0,075 м<sup>3</sup>/год. При цих умовах: ступінь вилучення іонів важких металів сягає 99,96%, а ущільнені осади мають максимальний вміст (більше ніж 91%) стійких феритних фаз з магнітними властивостями.

Встановлено, що витрата електроенергії на електромагнітну імпульсну активацію в порівнянні з традиційною високотемпературною процесу феритизації значно зменшується – на 60%. Крім того, зниження швидкості аерації до 0,075 м<sup>3</sup>/год дає можливість здешевити цю технологію на 10%, а отже, зробити її інвестиційно привабливою.

В подальшому вважаємо за доцільне дослідити іммобілізаційні властивості отриманих продуктів переробки шламів щодо сполук важких металів та можливість використання цих відходів як компонент для виробництва будівельних матеріалів спеціального призначення.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Tokach Y. E. Galvanic Sludge Recycling with the Extraction of Valuable Components / Y. E. Tokach, Y. K. Rubanov, N. A. Pivovarova, L. N. Balyatinskaya // Middle-East Journal of Scientific Research, 2013. Vol. 18, Issue. 11. – P. 1646–1655. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.18.11.70119.
2. Kurama H. Treatment and recovery of nickel rich precipitate from plating plant waste // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2009. Vol. 17, Issue. 4. – P. 212–218. doi: 10.3846/1648-6897.2009.17.212-218.
3. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2015 році. – К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, ФОР Грін Д.С, 2017. – 308 с.
4. Tua Yao-Jen Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process / Yao-Jen Tua, Chien-Kuei Chang, Chen-Feng Youa, Shan-Li Wangc // Journal of Hazardous Materials, 2012. Vol. 209 – 210. – P. 379–384.

5. Teremova M.I. Ferritization of industrial waste water and microbial synthesis of iron-based magnetic nanomaterials from sediments / M.I. Teremova, E.A. Petrakovskaya, A.S. Romanchenko, F.V. Tuzikov, Y.L. Gurevich, O.V. Tsbina, E.K. Yakubailik // *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2016. Vol. 35, Issue. 5.– P. 1407–1414. doi: 0.1002/ep.12368.
6. Prietoa F. Characterisation of zinc bearing-ferrites obtained as byproducts of hydrochemical waste-water purification processes / F. Prietoa, E. Barrado, J. Medinac // In: *Journal of Alloys and Compounds*, 2001. – vol. 325, is. 1-2, – P. 269–275.
7. Barrado E. Characterization of nickel-bearing ferrites obtained as byproducts of hydrochemical wastewater purification processes / E. Barrado, F. Rieto, F.J. Garay // In: *Electrochimica Acta*. 2002. – vol. 47, is. 22-23, – P. 1959–1965.
8. Barrado E. Characterization and electrochemical behavior of a copper ferrite obtained by in situ precipitation from aqueous solutions / E. Barrado, F. Prieto, M. Vega // In: *Electroanalysis*. 2000. – vol. 12, is. 5, – P. 383–389.
9. Heuss-Aßbichler S. Recovery of copper as zero-valent phase and or copper oxide nanoparticles from wastewater by ferritization / S. Heuss-Aßbichler, M. John, D. Klapper, U. W. Bläß, G. Kochetov // *Journal of Environmental Management*, 2016. – P. 33–41.
10. Kochetov G. Improvement of the ferritisation method for removal of nickel compounds from wastewater / G. Kochetov, D. Samchenko, I. Naumenko // *Givil and Environmental Engineering*, 2014. Vol. 5. – P. 143–148.
11. Kochetov G.M. Development of ferritization processing of galvanic waste with energy saving electromagnetic pulse activation of the process / G.M. Kochetov, T.O. Prikhna, D.M. Samchenko, O.Yu. Kovalchuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. – 6/10 (102). – P. 6–14.
12. Kochetov G. Research of the treatment of depleted nickel-plating electrolytes by the ferritization method / G. Kochetov, T. Prikhna, O. Kovalchuk, D. Samchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. – 3/6 (93). – P. 52–60. doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133797.
13. Frolova L.A. Structure and properties of nickel ferrites produced by glow discharge in the  $\text{Fe}^{2+}$ – $\text{Ni}^{2+}$ – $\text{SO}_4^{2-}$ – $\text{OH}^-$  system / L. A. Frolova, A. A. Pivovarov, A. S. Baskevich // *Russ J Appl Chem*, 2014. – 87(8). – P. 1054–1059.
14. Srinivasan R. Srinivasan R. Structural features in the formation of the green rust intermediate and  $\gamma$ - $\text{FeOOH}$  / R. Srinivasan, R. Lin, R.L. Spicer, B.H. Davis // *Col. and Surf. A: Physicochem. and Engin.As*, 1996. – 113, N 1. – P. 97–105.
15. Gunjakar J. L. Chemical synthesis of spinel nickel ferrite ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) nano-sheets / J. L. Gunjakar, A. M. More, K. V. Gurav, C. D. Lokhande // *App Surf Sci*, 2008. (254). – P. 5844–5848.

Стаття надійшла до редакції 05.02.2020 і прийнята до друку після рецензування 05.05.2020

## REFERENCES

1. Tokach, Y.E., Rubanov, Y.K., Pivovarova, N.A., & Balyatinskaya, L.N. (2013). Galvanic Sludge Recycling with the Extraction of Valuable Components. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 18(11), 1646-1655. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2013.18.11.70119.
2. Kurama, H. (2009). Treatment and recovery of nickel rich precipitate from plating plant waste. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 17(4), 212-218. doi: 10.3846/1648-6897.2009.17.212-218.
3. National report on the state of the environment in Ukraine in 2015. (2017). *Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine*. Kyiv: FOP Grin DS. (in Ukrainian)

4. Tua, Yao-Jen, Chang, Chien-Kuei, Youa, Chen-Feng, & Wangc, Shan-Li. (2012). Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process. *Journal of Hazardous Materials*, 209-210, 379-384.
5. Teremova, M.I., Petrakovskaya, E.A., Romanchenko, A.S., Tuzikov, F.V., Gurevich, Y.L. Tsibina, O.V., & Yakubailik, E.K. (2016). Ferritization of industrial waste water and microbial synthesis of iron-based magnetic nanomaterials from sediments. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 35(5), 1407-1414. doi: 0.1002/ep.12368.
6. Prietoa, F., Barrado, E., & Medinac, J. (2001). Characterisation of zinc bearing-ferrites obtained as byproducts of hydrochemical waste-water purification processes. *Journal of Alloys and Compounds*, 325(1-2), 269-275.
7. Barrado, E., Rieto, F., & Garay, F.J. (2002). Characterization of nickel-bearing ferrites obtained as byproducts of hydrochemical wastewater purification processes. *Electrochimica Acta*, 47(22-23), 1959-1965.
8. Barrado, E., Prieto, F., & Vega, M. (2000). Characterization and electrochemical behavior of a copper ferrite obtained by in situ precipitation from aqueous solutions. *Electroanalysis*, 12(5), 383-389.
9. Heuss-Aßbichler, 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*, 33-41.
10. Kochetov, G., Samchenko, D., & Naumenko, I. (2014). Improvement of the ferritisation method for removal of nickel compounds from wastewater. *Givil and Environmental Engineering*, 5, 143-148.
11. Kochetov, G.M., Prikhna, T.O., Samchenko, D.M., & Kovalchuk, O.Yu. (2019). Development of ferritization processing of galvanic waste with energy saving electromagnetic pulse activation of the process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/10(102), 6-14.
12. Kochetov, G., Prikhna, T., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2018). Research of the treatment of depleted nickel-plating electrolytes by the ferritization method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/6(93), 52-60. doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133797.
13. Frolova, L.A., Pivovarov, A.A., & Baskevich, A.S. (2014). Structure and properties of nickel ferrites produced by glow discharge in the  $\text{Fe}^{2+}$ -  $\text{Ni}^{2+}$ -  $\text{SO}_4^{2-}$  -  $\text{OH}^-$  system. *Russ J Appl Chem*, 87(8), 1054-1059.
14. Srinivasan, R., Lin, R., Spicer, R.L., & Davis, B.H. (1996). Structural features in the formation of the green rust intermediate and  $\gamma$ -FeOOH. *Col. and Surf. A: Physicochem. and Engin. As.*, 113(1), 97-105.
15. Gunjekar, J.L., More, A.M., Gurav, K.V., & Lokhande, C.D. (2008). Chemical synthesis of spinel nickel ferrite ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) nano-sheets. *App Surf Sci.*, (254), 5844-5848.

*The article was received 05.02.2020 and was accepted after revision 05.05.2020*

#### **Ємчуря Богдан Миколайович**

аспірант кафедри водопостачання та водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

**e-mail:** yemchura.b.m@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-8079-3407

#### **Кочетов Геннадій Михайлович**

доктор технічних наук, професор кафедри хімії Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

**e-mail:** gkochetov@gmail.com

ORCID ID: 0000-0003-0041-7335

**Васильєв Олексій**

доктор, професор, Державний університет Східного Теннесі

**Адреса робоча:** PO Box 70695, Johnson City, TN 37614, USA

**e-mail:** vasiliev@etsu.edu

ORCID ID: 0000-0003-2687-0672

**Самченко Дмитро Миколайович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідної частини  
Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

**e-mail:** sama30071988@gmail.com

ORCID ID: 0000-0003-3305-8180