

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.10>

УДК 628.
315/54-4

КИСЛОВА О. В., ПАТЛУН Д. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НЕОРГАНІЧНИХ СПОЛУК ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ГАЛЬВАНІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Мета. Аналіз сучасних хімічних технологій очищення концентрованих стоків та промивних вод гальванічних виробництв; узагальнення особливостей використання неорганічних речовин для знешкодження стічних вод.

Методика. Аналітичний огляд наукової та науково-практичної літератури для систематизації методів застосування неорганічних сполук різних класів для очищення ціано- та хромовмісних стоків гальванічних виробництв, осадження йонів важких металів, нейтралізації рН стічних вод.

Результати. Для знешкодження концентрованих стоків та промивних вод гальванічних виробництв широко використовуються мінеральні кислоти та луги для нейтралізації, окисники (рідкий хлор, хлорне вапно, гіпохлорит кальцію або натрію, озон, калій перманганат, гідроген пероксид), відновники (сульфіт, гідрогенсульфіт, тіосульфат натрію, ферум сульфат), а також гідроксиди, карбонати, сульфіді для осадження йонів важких металів. Перевагами реагентного методу є універсальність, простота експлуатації, застосування недорогого обладнання, широкий інтервал початкових концентрацій йонів, можливість сумісного очищення стічних вод різних гальванічних процесів після попереднього знешкодження токсичних ціано- та хромовмісних стоків. Нагальним завданням є вдосконалення реагентних методів з метою зниження витрат хімічних сполук, підвищення повноти вилучення йонів металів та інших шкідливих речовин, спрощення їх подальшого виділення зі шламу для повної утилізації.

Наукова новизна. Обґрунтовано оптимальні умови застосування неорганічних сполук для знешкодження стічних вод гальванічних виробництв, які передбачають необхідність враховувати характеристики стоків конкретного гальванічного виробництва, такі як концентрації забруднюючих речовин, рН, наявність додаткових сполук у складі електролітів та інші фактори.

Практична значимість. Узагальнено напрямки очищення стічних вод гальванічних виробництв реагентним методом, охарактеризовано основні неорганічні сполуки, які застосовуються для знешкодження концентрованих стоків і промивних вод гальванічних виробництв, оптимальні умови їх використання.

Ключові слова: неорганічні речовини; гальванічне виробництво; стічні води; реагентний метод очищення.

Вступ. Гальванічне виробництво застосовується для нанесення різноманітних металевих покриттів, таких як хром, нікель, мідь, цинк, кадмій та олово, з метою покращення фізичних та хімічних властивостей виробів. Цей процес спрямований на збільшення стійкості виробів до корозії та покращення їх зовнішнього вигляду. Проте гальванічне виробництво є одним з найбільш екологічно шкідливих. Джерелами забруднення навколишнього середовища в гальванотехніці є відпрацьовані концентровані розчини електролітів, розчини знежирення та травлення, пасивування, анодування, електролітичного полірування та промивні води різних технологічних операцій. Зі стічними водами у навколишнє середовище потрапляє значна кількість сполук кольорових металів, органічні та неорганічні речовини, розчини мінеральних кислот та лугів [1, 2].

Відомо, що токсична дія йонів важких металів при накопиченні в організмі людини призводить до виникнення гострих і хронічних запальних процесів; модифікації метаболізму біологічно активних речовин, ліпідів, білків, ДНК, РНК; посилення перекисного окиснення ліпідів; змін енергетичного обміну. Надлишок йонів важких металів в організмі порушує функції серцево-судинної та нервової систем, роботу шлунково-кишкового тракту та

центральної нервової системи, призводить до розладів слуху, зору, підвищує ризик онкозахворювань [3, 4].

Очищення стічних вод можна здійснювати з застосуванням хімічних та фізико-хімічних методів. Найбільш поширеними є наступні хімічні методи очищення: реагентні методи виділення забруднюючих речовин у вигляді малорозчинних та нерозчинних сполук, нейтралізація, окиснення та відновлення. Хімічна обробка здійснюється у системах локального очищення виробничих стічних вод, перед їх подачею в систему оборотного водопостачання або спуском у водоймище чи міську каналізаційну мережу. Також хімічний метод застосовується для попереднього очищення стічних вод перед використанням біологічних або фізико-хімічних методів [5–7].

Постановка завдання. Провести аналіз сучасних хімічних технологій очищення концентрованих стоків та промивних вод гальванічних виробництв; систематизувати дані щодо ефективності та умов застосування різних неорганічних речовин для знешкодження стічних вод гальванічного виробництва.

Результати дослідження. Стоки гальванічного виробництва містять концентровані розчини солей, лугів, кислот та промивні води з різними показниками рН. Залежно від рН середовища нанесення електрохімічного покриття стічні води можна розділити на кислі та лужні. Окремо потрібно виділити стічні води, які містять токсичні ціано- та хромовмісні сполуки, оскільки вони потребують застосування спеціальних методів обробки [8, 9]. Загальна характеристика стічних вод гальванічного виробництва наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Загальна характеристика стічних вод гальванічного виробництва

Стічні води	Ціаністі (рН = 8-11)	Хромовмісні (рН = 4-5)	Кислі (рН = 1-3)	Лужні (рН = 9-11)
1	2	3	4	5
Процеси	цинкування, міднення, сріблення, кадміювання, освітлення мідних деталей після зняття нікелевого, хромового покриття	хромування, травлення, пасивування, анодування, електролітичне полірування сталевих виробів	знежирення, травлення, міднення, цинкування, нікелювання	цинкування, міднення, кадміювання, олов'янування
Концентровані стоки	Комплексні ціаніди важких металів (особливо цинку) схильні до утворення нерозчинних сполук на стінках труб та резервуарів при зниженні рН до 8–9. Через утворення токсичної синильної кислоти ціаністий стік не можна змішувати з кислим стоком	Стоки можуть містити до 300 г/л хром(VI) ангідриду. Він дуже леткий, особливо при підвищеній температурі	Відпрацьовані на 50–80% розчини з вмістом вільної кислоти 20–50% по відношенню до вихідного. Розчини декапірування скидаються у концентраціях майже рівних вихідним. Можуть містити до 20 г/л суспензії забруднюючих речовин	Утворюються при зміні концентрованих знежирювальних розчинів і можуть містити сполуки в наступних діапазонах концентрацій: NaOH – 20–30 г/л, Na ₂ CO ₃ – 10–30 г/л, Na ₃ PO ₄ – 20–30 г/л, Na ₂ SiO ₃ – 1–2 г/л

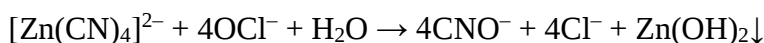
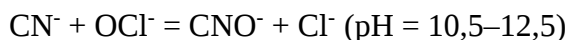
Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Промивні води	після нанесення гальванопокриттів із ціаністих ванн містять 50–100 мг/л комплексних ціанідів важких металів. Схильні до утворення нерозчинних сполук при pH = 8–9	після хромування та травлення містять 10–100 мг/л Cr(VI) та 1–15 мг/л інших металів. Має корозійну активність, пасивує сталь, посилено діє на місця зварювання, що містять сторонні включення	після операцій декапірування та травлення містять переважно хлоридну, сульфатну, рідше нітратну та фосфатну кислоти, солі феруму та інших металів, що підлягають травленню. Мають високу корозійну активність	після операцій нанесення гальванопокриттів в лужному середовищі, а також знежирення (містять 50–150 мг/л олій та нафтопродуктів)

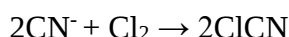
Отже, стічні води гальванічних виробництв можуть містити токсичні ціаніди та сполуки Cr(VI), солі важких металів, поверхнево-активні речовини та емульговані жири. Очищення стічних вод полягає в першу чергу у знешкодженні ціанідів та сполук Cr(VI), подальшій частковій взаємній нейтралізації всіх видів стічних вод, а також у застосуванні кислот (хлоридна або сульфатна) або лугів (вапняне молоко) для повної нейтралізації. Наявність ПАР та масляно-жирових забруднень знижує загальну якість очищення стічних вод, тому жири видаляють зі стоків фільтруванням [6, 7].

Для знешкодження стічних вод, що містять ціанід-іони, їх окиснюють сполуками, що містять активний хлор (рідкий хлор, хлорне вапно, гіпохлорит кальцію або натрію), озоном, калій перманганатом, пероксидом гідрогену [8].

Окиснення ціанідів до ціанатів у присутності гіпохлориту протікає за рівнянням:



Як проміжний продукт утворюється токсичний газ хлорціан:



Для усунення цього процесу необхідно постійно нейтралізувати розчином лугу хлоридну кислоту, яка виділяється як побічний продукт реакції.

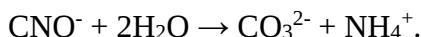
Швидкість окиснення ціанідів залежить від температури та значно зменшується при її зниженні. Також потрібно контролювати концентрацію хлоровмісних окисників, оскільки збільшення залишкової кількості активного хлору підвищує утворення побічних токсичних продуктів. Встановлено оптимальні умови проведення реакції, які мінімізують утворення хлорціану: концентрація ціанідів в стічній воді становить 0,2–1 г/л; слабко лужне середовище з pH > 8,5; t < 50°C.

Подальша нейтралізація ціанатів може здійснюватись двома способами:

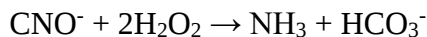
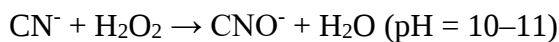
1) в лужному середовищі при pH = 7,5–8,5 ціанати окиснюються до вуглекислого газу та вільного азоту:



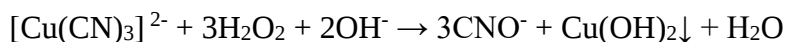
2) в кислому середовищі при pH < 3 вони гідролізують до солей амонію:



Ціаніди також можна окиснити при взаємодії з гідроген пероксидом. Застосовувати цей окисник економічно доцільно для знешкодження відносно концентрованих стоків ($[\text{CN}^-] > 1 \text{ г/л}$):

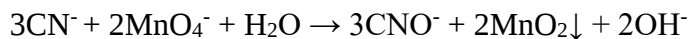


Комплексні ціаніди окиснюються гідроген пероксидом швидше і легше, ніж прості ціаніди:



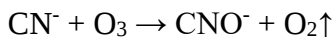
Перевагами застосування гідроген пероксиду є: самовільний розклад надлишку реагенту, відсутність утворення токсичних проміжних сполук, знешкодження ціанідів до гранично допустимих концентрацій.

У присутності калій перманганату окиснення ціанідів відбувається за реакцією:



Завдяки високому ступеню очищення від ціанідів даний метод надає можливість повторного використання очищеної води в гальванічному виробництві. Проте висока вартість калій перманганату і необхідність видалення з води осаду MnO_2 є суттєвими недоліками цього способу.

За допомогою озону можна окиснювати значні об'єми стічних вод у слабколужному середовищі (pH 9–10), якщо $[\text{CN}^-] < 100 \text{ мг/л}$:



В процесі розкладу озону утворюється атомарний кисень. Як каталізатори використовують солі купруму, феруму, ванадію. Для кількісного проведення реакції та зменшення витрати озону необхідно також постійно видаляти осади гідроксидів та карбонатів.

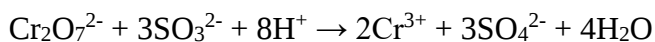
Однією з основних переваг даного методу є можливість окиснення органічних сполук, проте процес отримання озону є енергоємним, дорогим та потребує громіздкого устаткування.

Окремого очищення потребують хромовмісні стічні води, які містять високотоксичні сполуки Cr (VI) [9]. Знешкодження таких стоків відбувається у дві стадії:

- 1) відновлення високотоксичних сполук шестивалентного хрому до Cr (III);
- 2) осадження йонів Cr (III) у вигляді гідроксиду.

Для відновлення сполук Cr (VI) до Cr (III) найчастіше використовуються натрій сульфід (Na_2SO_3) або гідрогенсульфіт (NaHSO_3), натрій піросульфід ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), натрій тіосульфат ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) в кислому середовищі.

Зокрема відновлення за допомогою натрій сульфіту відбувається наступним чином:



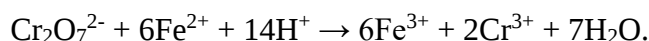
Найбільша швидкість відновлення сполук хрому солями сульфітної кислоти спостерігається в кислому середовищі при pH = 2–2,8, що потребує додаткового підкислення стічних вод. Суттєвим недоліком також є те, що ці відновники в процесі зберігання легко окиснюються, що призводить до збільшення їх витрат.

Відновлення Cr (VI) за допомогою інших сульфурвмісних сполук – SO_2 чи H_2S – можливе на виробництвах, де ці речовини утворюються як побічні продукти. Перевагою використання сульфідів для утилізації сполук хрому є їх подвійні властивості: сульфід-аніони є не лише відновниками йонів Cr(VI), але вони також осаджують йони Cr (III) у вигляді важкорозчинних гідроксидів – продуктів гідролізу сульфідів (максимальне осадження

відбувається при $\text{pH} = 11$). До недоліків цього методу слід віднести значну витрату реагентів, додаткове використання кислоти.

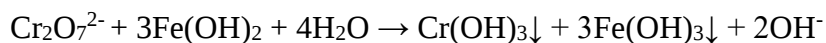
Як реагенти-відновники також можуть бути використані відходи металевого заліза – сталева стружка, шар якої використовується для фільтрування ($\text{pH} = 2\text{--}2,5$). Більш ефективним є фільтрування через колонку, заповнену сумішшю металевих Al та Fe стружок (співвідношення від 0,5:1 до 3:1), оскільки утворення гальванопар Fe /Al знижує пасивацію поверхні алюмінію хроматами. Однак при відновленні Cr (VI) залізом і його сполуками значно зростає кількість шламу через осадження ферум гідроксиду [9].

Реакція з застосуванням FeSO_4 як реагента-відновника перебігає з досить високою швидкістю не тільки в кислому, але й нейтральному і лужному середовищах. Зокрема, в кислому середовищі відбувається наступна реакція:



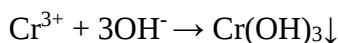
Для повного відновлення Cr (VI) до Cr (III) необхідний лише незначний надлишок реагенту (близько 5% від стехіометричної кількості). Ферум (II) сульфат також є коагулянт, що дозволяє ефективно видаляти з розчину забруднення органічного характеру, які знаходяться в колоїдному завислому стані, та отримувати менш каламутну та знебарвлену воду.

Протікання реакції відновлення Cr(VI) можливе і без попереднього підкислення у присутності суспензії Fe (II) гідроксиду:

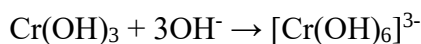


Значним недоліком використання сульфату заліза, а також суспензії $\text{Fe}(\text{OH})_2$ як відновників у порівнянні з солями сульфитної кислоти, є збільшення об'єму осаду внаслідок утворення значної кількості нерозчинного Fe (III) гідроксиду.

Після відновлення Cr(VI) у кислому середовищі стічні води нейтралізують для осадження іонів Cr(III) у вигляді гідроксиду [10]:



На установках безперервної дії цю стадію здійснюють після попереднього змішування стічних вод з іншими видами кислих і лужних вод гальванічного виробництва, тоді як на установках періодичної дії хромовмісні стічні води нейтралізують окремо. Для нейтралізації до $\text{pH} = 8,5\text{--}9$ застосовують переважно вапняне молоко, рідше соду або натрій гідроксид. Оскільки Cr(III) гідроксид має амфотерний характер, при підвищенні значення pH він починає розчинятись з утворенням комплексної солі:



При змішуванні знешкоджених хромо- та ціановмісних стічних вод з високою концентрацією активного хлору відбувається реакція, яка призводить до зворотного окиснення сполук хрому (III) до хрому (VI). Так, в присутності надлишку натрій гіпохлориту в лужному середовищі утворюються хромат-аніони:



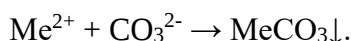
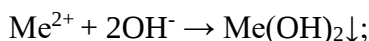
Щоб запобігти такому процесу, надлишок активного хлору з ціановмісних стоків окиснюють натрій тіосульфатом або збільшують кількість відновників в стоках.

Кінцевим етапом очищення після змішування всіх видів стоків гальванічного виробництва є осадження йонів важких металів та нейтралізація до необхідного значення pH [10, 11].

Для попереднього видалення сполук важких металів з стічних вод найбільш поширеними є реагентні методи очищення, які засновані на осадженні розчинних у воді речовин в реакціях подвійного обміну з подальшим відокремленням їх у вигляді осадів.

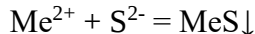
Так, очищення стічних вод від іонів важких металів здійснюється шляхом переведення їх в малорозчинні сполуки (гідроксиди, основні карбонати, сульфід) при нейтралізації стічних вод лужними реагентами (гідроксиди та карбонати кальцію, натрію, магнію; оксиди кальцію та магнію; оксидовмісні відходи, наприклад, ферохромовий шлак (суміш CaO – 51,3%; MgO – 9,2%; SiO_2 – 27,4%; Cr_2O_3 – 4,13%; Al_2O_3 – 7,2%; FeO – 0,73%); сульфід натрію). Утворені осади видаляють відстоюванням, флотацією, фільтруванням [10].

Розповсюдженим методом є нейтралізація стічних вод вапняним молоком з подальшим відстоюванням в горизонтальних відстійниках безперервної дії. При нейтралізації кислих стічних вод вапняним молоком, а також розчинами соди іони металів осаджуються у вигляді гідроксидів, основних карбонатів або карбонатів, які характеризуються нижчим значенням добутку розчинності, ніж відповідні гідроксиди [11, 12].



Швидкість осадження сполук можна контролювати за допомогою рН, температури та перемішування.

Більш ефективним реагентом для вилучення кольорових металів є натрій сульфід [10]. Відомо, що розчинність сульфідів важких металів значно нижча порівняно з розчинністю інших важкорозчинних електролітів, зокрема гідроксидів та карбонатів. Осаджувати іони важких металів у вигляді сульфиду можна за участю тіокарбонатів лужних або лужноземельних металів (наприклад, Na_2CS_3 при рН = 6–9) або суспензії FeS_2 з масовою часткою 1–2% [10, 13].



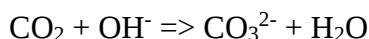
Оскільки гідроксиди та сульфід важких металів утворюють стійкі колоїдні системи, для повного їх осадження вводять коагулянти. Колоїдні частинки мають негативний заряд, тому як коагулянти використовують електроліти з багатозарядними катіонами (переважно алюміній сульфат, залізний купорос, ферум (III) хлорид або їх суміші). Також можна використовувати глини, алюмінієві відходи виробництва, суміші з кремній (IV) оксидом.

Для прискорення процесу коагуляції застосовують різні флокулянти, найбільшого розповсюдження серед яких набули поліакриламід та активована силікатна кислота. Так, введення в розчин поліакриламід у збільшує швидкість осадження сульфідів та гідроксидів металів у 2–3 рази [2].

Осадження іонів важких металів можна здійснити при обробці фосфатною кислотою або її солями. Утворені фосфати переважно характеризуються меншим значенням добутку розчинності, ніж відповідні гідроксиди. Процес осадження іонів металів має наступні стадії:

- 1) додавання до водного розчину важкого металу фосфорної кислоти або її кислій солі у співвідношенні 1:1;
- 2) коригування рН розчину сульфатною кислотою (рН = 3);
- 3) додавання коагулянту (FeCl_3 у концентрації 0,75–1,5 г/л);
- 4) осадження фосфатів металів у лужному середовищі при додаванні кальцій гідроксиду (рН = 8,5).

Для нейтралізації лужних стічних вод можна використовувати вуглекислий газ, джерелом якого є димові гази [14]:



Перевагами реагентного методу очищення стічних вод є: універсальність, простота експлуатації, можливість одночасної обробки промивних вод і концентрованих розчинів, широкий інтервал початкових концентрацій іонів.

До недоліків методу можна віднести значну витрату реагентів та додаткове забруднення ними стічних вод, неповне вилучення іонів металів, потреба в місцях зберігання утворених осадів, неможливість повернення очищеної води в оборотний цикл через наявність залишкових концентрацій металів, необхідність використання додаткових фізико – хімічних (іонообмінні, електрохімічні, адсорбційні, мембранні, зворотний осмос) та біологічних методів вилучення важких металів зі шламу для подальшої утилізації [15].

Утилізація шламів, що утворюються при очищенні стічних вод, може проводитися шляхом застосування їх як добавки до цементу, асфальту, скла і пластмас, а також при переробці в фарби, вогнетривкі матеріали та штучні наповнювачі. Добавки гальванічних відходів до складу будівельних матеріалів поліпшують їх експлуатаційно-технічні характеристики [16].

Висновок. Очищення стічних вод гальванічного виробництва об'єднує комплекс хімічних, фізико-хімічних та біологічних методів, вибір яких визначається технологічними вимогами, наявністю матеріальних та енергетичних ресурсів, економічними чинниками процесу. Універсальні хімічні методи з застосуванням неорганічних сполук, які включають окиснення та відновлення забруднюючих речовин, їх осадження у вигляді важкорозчинних сполук, нейтралізацію стоків, дають можливість значно знизити вміст шкідливих речовин, в деяких випадках до гранично допустимих концентрацій. Дотримання оптимальних умов (значення рН, температура, концентрації реагентів) для проведення хімічних перетворень, застосування ефективних коагулянтів та флокулянтів сприяє зниженню витрат хімічних сполук, підвищенню повноти вилучення іонів металів та інших шкідливих речовин, спрощує їх подальше виділення зі шламу для повної утилізації. Реагентний метод обробки стічних вод підвищує ефективність подальшого застосування фізико-хімічних та біологічних методів для знешкодження стоків гальванічних виробництв та є основою створення безвідходних технологій.

References

1. Rajoria, S., Vashishtha, M., Sangal, V. K. (2022). Treatment of electroplating industry wastewater: A review on the various techniques. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, Vol. 29, P. 72196–72246. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18643-y>.
2. Makisha, N., Yunchina, M. (2017). Methods and solutions for galvanic waste water treatment. *MATEC Web Conf.*, 106:07016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710607016>.
3. Mitra, S., Chakraborty, A., Tareq, A., Emran, T. (2022). Impact of Heavy Metals on the Environment and Human Health: Novel Therapeutic Insights to Counter the Toxicity. *J. King Saud Univ.-Sci.*, Vol. 34, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.
4. Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A., Sutton, D. (2012). Heavy Metals Toxicity and the Environment. *Exp. Suppl.*, Vol. 101, P. 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
5. Fu, F., Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J. of Environ.*

Література

1. Rajoria S., Vashishtha M., Sangal V. K. Treatment of electroplating industry wastewater: A review on the various techniques. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. Vol. 29. P. 72196–72246. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18643-y>.
2. Makisha N., Yunchina M. Methods and solutions for galvanic waste water treatment. *MATEC Web Conf.* 2017. 106:07016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710607016>.
3. Mitra S., Chakraborty A., Tareq A., Emran T. Impact of Heavy Metals on the Environment and Human Health: Novel Therapeutic Insights to Counter the Toxicity. *J. King Saud Univ.-Sci.* 2022. Vol. 34. 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.
4. Tchounwou P., Yedjou C., Patlolla A., Sutton D. Heavy Metals Toxicity and the Environment. *Exp. Suppl.* 2012. Vol. 101. P. 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
5. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J. of Environ. Manag.* 2011.

- Manag., Vol. 92, Issue 3, P. 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.
6. Qin, J. J., Wai, M. N., Oo, M. H., Wong, F. S. (2002). A feasibility study on the treatment and recycling of a wastewater from metal plating. *J. Membr. Sci.*, Vol. 208, P. 213–221. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00263-6).
7. Qasem, N., Mohammed, R., Lawal, D. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Clean Water.*, Vol. 4:36, P. 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>.
8. Jaszczak, E., Polkowska, Z., Narkowicz, S., Namieśnik, J. (2017). Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, P. 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9081-7>.
9. Barrera-Díaz, C., Lugo-Lugo, V., Bilyeu, B. (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *J. of Hazardous Materials.*, Vol. 223–224, P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.054>.
10. Chen, Q., Yao, Y., Li, X., Lu, J., Zhou, J., Huang, Z. (2018). Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 26, P. 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.003>.
11. Balladares, E., Jerez, O., Parada, F., Baltierra, L., Hernández, C., Araneda, E., Parra, V. (2018). Neutralization and co-precipitation of heavy metals by lime addition to effluent from acid plant in a copper smelter. *Minerals Engineering*, Vol. 122, P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.028>.
12. Tsai, T., Chou, H., Wu, Y. (2020). Removal of nickel from chemical plating waste solution through precipitation and production of micro-sized nickel hydroxide particles. *Separation and Purification Technology*, Vol. 251, 117315. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117315>.
13. Thomas, M., Kozik, V., Bak, A., Barbusin'ski, K., Jazowiecka-Rakus, J., Jampilek, J. (2021). Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: An Application of Sodium Trithiocarbonate and Wastewater Toxicity Assessment. *Materials*, 14(3), 655, P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14030655>.
14. Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., Tyrer, M. (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: Sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*, Vol. 43 (10), P. 2605–2614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>.
15. Ghodke, S., Maheshwari, U., Gupta, S., Bhanvase, B. (2023). 7 – Treatment of hazardous industrial solid wastes. Vol. 92, Issue 3, P. 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.
6. Qin J. J., Wai M. N., Oo M. H., Wong F. S. A feasibility study on the treatment and recycling of a wastewater from metal plating. *J. Membr. Sci.* 2002. Vol. 208. P. 213–221. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00263-6).
7. Qasem N. A. A., Mohammed R. H., Lawal D. U. Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Clean Water.* 2021. Vol. 4:36. P. 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>.
8. Jaszczak E., Polkowska Z., Narkowicz S., Namieśnik J. Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017. P. 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9081-7>.
9. Barrera-Díaz C., Lugo-Lugo V., Bilyeu B. A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *J. of Hazardous Materials.* 2012. Vol. 223–224. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.054>.
10. Chen Q., Yao Y., Li X., Lu J., Zhou J., Huang Z. Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*. 2018. Vol. 26. P. 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.003>.
11. Balladares E., Jerez O., Parada F., Baltierra L., Hernández C., Araneda E., Parra V. Neutralization and co-precipitation of heavy metals by lime addition to effluent from acid plant in a copper smelter. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 122. P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.028>.
12. Tsai T., Chou H., Wu Y. Removal of nickel from chemical plating waste solution through precipitation and production of micro-sized nickel hydroxide particles. *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 251. 117315. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117315>.
13. Thomas M., Kozik V., Bak A., Barbusin'ski K., Jazowiecka-Rakus J., Jampilek J. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: An Application of Sodium Trithiocarbonate and Wastewater Toxicity Assessment. *Materials*. 2021. 14(3). 655. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14030655>.
14. Chen Q., Luo Z., Hills C., Xue G., Tyrer M. Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: Sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*. 2009. Vol. 43 (10). P. 2605–2614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>.
15. Ghodke S., Maheshwari U., Gupta S., Bhanvase B. 7 – Treatment of hazardous industrial solid wastes

industrial solid wastes from electroplating industry: a comprehensive review. 360-Degree Waste Management, Vol. 2, P. 141–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90909-9.00002-2>.

16. Wang, H., Liu, X., Zhang, Z. (2024). Approaches for electroplating sludge treatment and disposal technology: Reduction, pretreatment and reuse: Review. *J. Environ. Manag.*, Vol. 349, P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119535>.

from electroplating industry: a comprehensive review. 360-Degree Waste Management. 2023. Vol. 2. P. 141–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90909-9.00002-2>.

16. Wang H., Liu X., Zhang Z. Approaches for electroplating sludge treatment and disposal technology: Reduction, pretreatment and reuse: Review. *J. Environ. Manag.* 2024. Vol. 349. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119535>.

KYSLOVA OLHA

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Department of Chemical Technologies and Resource
Saving, Kyiv National University of Technologies and
Design, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0002-0223-1860>

Scopus Author ID: 22034723000

E-mail: kislova.ov@knuatd.com.ua

PATLUN DMYTRO

Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies
and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-3832-1996>

E-mail: dimapatlun@gmail.com

KYSLOVA O. V., PATLUN D. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

PERSPECTIVES OF INORGANIC COMPOUNDS APPLICATION FOR ELECTROPLATING INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT

Purpose. Analysis of modern chemical technologies for electroplating industry concentrated effluents and washing wastewaters treatment; generalization of the peculiarities of inorganic substances using for the wastewater purification.

Methodology. Analytical review of scientific and scientific-practical literature for the systematization of inorganic compounds application for galvanic industries cyano- and chromium-containing wastewaters treatment, precipitation of heavy metal ions, neutralization of pH wastewaters.

Findings. Mineral acids and alkalis for neutralization, oxidizers (liquid chlorine, chlorinated lime, calcium or sodium hypochlorite, ozone, potassium permanganate, hydrogen peroxide), reducing agents (sodium sulfite, sodium hydrogen sulfite, sodium thiosulfate, iron (II) sulfate), as well as hydroxides, carbonates, sulfides for precipitation of heavy metal ions are widely used for electroplating industry wastewaters decontamination. The advantages of the reagent method include universality, ease of operation, use of inexpensive equipment, a wide range of initial ion concentrations, the possibility of joint treatment of wastewaters from various galvanic processes after toxic cyano- and chromium-containing wastewaters purification. The main task is to improve reagent wastewaters treatment methods with the aim of reducing of chemical compounds using, increasing the completeness of metal ions and other harmful substances extraction, simplifying their subsequent separation from sludge for complete utilization.

Originality. The optimal conditions for the inorganic compounds application for the electroplating industry wastewaters treatment are substantiated, implying the need to take into account the characteristics of the specific galvanic production effluents, such as the concentration of pollutants, pH values, the presence of additional compounds in the electrolytes composition and other factors.

Practical value. The directions of electroplating industry wastewater treatment by the reagent methods are summarized, the main inorganic compounds used for the concentrated effluents and washing waters treatment and the optimal conditions for their use are characterized.

Keywords: inorganic substances; electroplating industry; wastewaters; reagent method.