

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-95-108>

УДК 621.928:628.56

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УТИЛІЗАЦІЇ ШЛАМОВИХ ВІДХОДІВ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ ЯК КАТАЛІЗАТОРІВ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ: ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВ

Шмиголь С.О., Столяренко Г.С.

MODERN APPROACHES TO THE UTILISATION OF SLUDGE WASTE FROM ELECTROPLATING AS A CATALYST FOR GAS FLOW PURIFICATION: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND PROSPECTS

Shmyhol S.O., Stoliarenko H.S.

Проведено аналіз сучасних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв та їх використання, як каталізаторів для очищення газових потоків. Актуальність дослідження обумовлена зростанням обсягів промислових відходів і необхідністю розробки екологічно безпечних та економічно доцільних методів їх переробки. У цьому контексті особлива увага приділяється технологіям, що дозволяють перетворювати шламові відходи гальванічних виробництв не лише на побічні продукти, а й на корисні каталізатори для процесів очищення газових потоків. Мета статті – здійснити огляд сучасних підходів до утилізації шламових відходів гальванічних виробництв, зокрема, через використання їх як каталізаторів для очищення газових потоків. У дослідженні застосовано системний аналіз наукових джерел, експериментальні дослідження каталітичних властивостей матеріалів, отриманих із шламових відходів, а також порівняльний аналіз економічних та екологічних параметрів різних методів утилізації. Основні результати роботи включають оцінку ефективності різних підходів, зокрема термічної, хімічної та біотехнологічної обробки шламів, а також використання нанотехнологій для підвищення активності каталізаторів. Виявлено, що оптимальними є методи, що забезпечують високу каталітичну активність при мінімальних енергетичних витратах. Здійснено екологічну оцінку сучасних технологій переробки шламів. Визначено, що більш безпечними для навколишнього середовища та перспективними для малих підприємств є біотехнологічні методи переробки. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та застосування новітніх матеріалів сприятимуть екологічній модернізації промисловості та розвитку

циркулярної економіки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних процесів, підвищення ефективності каталізаторів та зниження витрат на їх виробництво. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та застосування новітніх матеріалів сприятимуть екологічній модернізації промисловості та розвитку циркулярної економіки. Отримані результати можуть бути корисними для промислових підприємств у виборі технологій переробки відходів та вдосконалення систем очищення повітря, сприяючи розвитку екологічної безпеки.

Ключові слова: утилізація, шламові відходи, гальванічні виробництва, каталізатори, очищення газових потоків, хімічна активація, екологічна безпека.

Вступ. Проблема утилізації шламових відходів гальванічних виробництв є однією з найбільш актуальних у сучасній екології та промисловій практиці [1]. У відповідності до праці [2] сучасні гальванічні виробництва, які включають процеси електролітичного осадження металів, зокрема, в галузях машинобудування, електроніки, автомобільної промисловості, супроводжуються утворенням великих обсягів шламів. Ці відходи складаються із важких металів, таких як кадмій, свинець, мідь, хром, а також кислотних та лужних речовин, що робить їх особливо небезпечними для навколишнього середовища і здоров'я людини. На тлі зростаючого промислового

виробництва та посилення екологічних вимог до зменшення викидів забруднювальних речовин проблема утилізації шламів набуває глобального масштабу.

В Україні та світі обсяг таких відходів щороку збільшується [3], а традиційні методи їх утилізації, зокрема захоронення на полігонах, або спалювання, не лише є ресурсозатратними, але й створюють додаткові екологічні загрози. Викиди токсичних речовин із шламів можуть проникати в ґрунт, водні ресурси та атмосферу, що у свою чергу спричиняє забруднення екосистем і має негативний вплив на біорізноманіття, агросектор і людське здоров'я. Водночас, сучасні технології очищення газових потоків, що включають фільтрацію забруднюючих газів, зокрема оксидів азоту (NO_x), сірководню (H_2S) та інших шкідливих компонентів, стають одними з найважливіших елементів екологічної безпеки в промисловості. Очищення повітря, особливо в умовах розвинених мегаполісів та промислових регіонів, є критично важливим для зменшення шкідливого впливу на здоров'я населення. Водночас, зростаючі вимоги до зниження екологічного навантаження змушують розглядати нові рішення, які поєднують ефективну утилізацію промислових відходів з очищенням газових викидів.

У цьому контексті особлива увага приділяється технологіям, що дозволяють перетворювати шламові відходи гальванічних виробництв не лише на побічні продукти, а й на корисні каталізатори для процесів очищення газових потоків. Використання шламів як каталізаторів є перспективним напрямом, який дозволяє одночасно вирішувати проблеми утилізації відходів і зменшення забруднення атмосфери. Це може бути ефективним рішенням для комплексної переробки токсичних відходів і одночасного покращення якості навколишнього середовища. Актуальність порушеної проблеми підкріплюється як високими екологічними вимогами до промислових підприємств, так і необхідністю зниження витрат на утилізацію відходів. Дослідження і впровадження нових технологій утилізації шламів, зокрема через їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків, може стати важливим етапом у розвитку зеленої економіки та індустрії переробки відходів. Окрім цього, подібні інноваційні технології можуть мати економічну вигоду, знижуючи витрати на утилізацію та одночасно створюючи додаткові можливості

для вторинного використання промислових відходів.

У результаті проблема утилізації шламових відходів гальванічних виробництв у контексті їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків є надзвичайно актуальною та важливою для сталого розвитку промисловості та охорони навколишнього середовища. Вона вимагає комплексного підходу та застосування інноваційних технологій, які дозволяють не лише ефективно управляти відходами, а й знижувати екологічні ризики для суспільства.

Мета роботи – здійснити огляд сучасних підходів до утилізації шламових відходів гальванічних виробництв, зокрема, через використання їх як каталізаторів для очищення газових потоків. Аналізуючи існуючі технології, розглянути їх ефективність, потенціал для зменшення екологічного навантаження, а також економічні аспекти впровадження таких рішень. Окрім того, особливу увагу буде приділено перспективам розвитку даних технологій, зокрема можливостям вдосконалення процесів на основі нових матеріалів, методів обробки шламів та інноваційних підходів до забезпечення сталого розвитку галузі. Таким чином, цей огляд стане важливим внеском у розуміння потенціалу використання шламів гальванічних виробництв не лише як відходів, а й як ефективного ресурсу для екологічної та промислової модернізації.

Матеріали та методологія. Матеріали дослідження базуються на аналізі наукових статей, технічних звітів і патентної документації, що охоплює сучасні підходи до утилізації шламів та використання їх у якості каталізаторів для очищення газових потоків. Зазначені матеріали допомагають створити комплексну картину існуючих технологій та визначити напрямки для їх подальшого вдосконалення.

Методологія дослідження, описаного в цій статті дослідження базується на системному підході, який дозволяє всебічно вивчити технології утилізації шламових відходів гальванічних виробництв та їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків. Першим етапом є комплексний розгляд існуючих методів утилізації шламів, таких як захоронення, термічна обробка та хімічна нейтралізація, а також їх застосування в якості каталізаторів для очищення газів, що дозволяє оцінити ефективність традиційних методів і відкрити нові можливості для використання шламів як корисних продуктів. Другим етапом є

оцінка каталізаторних властивостей шламів, що містять важкі метали та інші токсичні компоненти. Проводяться дослідження щодо їх активності в процесах очищення газів, таких як зменшення концентрації оксидів азоту (NO_x), сірководню (H_2S) і окислів вуглецю (CO). Експериментальні дані дозволяють отримати уявлення про те, наскільки ефективно шлами можуть використовуватися в промислових процесах очищення повітря. У ході дослідження також проводиться порівняння різних методів очищення газових потоків за допомогою шламових відходів з традиційними технологіями, які використовують дорогі метали та інші спеціалізовані каталізatori. Оцінюються техніко-економічні показники кожного методу, зокрема витрати на утилізацію відходів і на очищення газів, що дозволяє визначити найбільш економічно вигідні і ефективні підходи. Нарешті, вивчаються перспективи подальшого розвитку технологій, що використовують шлами як каталізatori для очищення газів. Особлива увага приділяється інноваційним матеріалам і методам, таким як використання наноматеріалів, а також новим методам синтезу та обробки каталізаторів, що можуть забезпечити ще вищу ефективність та екологічну безпеку в процесах очищення.

Оцінювання ефективності технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв як каталізаторів очищення газових потоків здійснювалося за кількома критеріями, що дозволяють визначити їх здатність забезпечувати високий рівень очищення при мінімальних енергетичних витратах, економічній вигоді та впливі на навколишнє середовище. Ось основні критерії, на яких базується оцінка ефективності цих технологій:

1. Ефективність очищення. Це основний критерій, що визначає, наскільки ефективно технологія знижує концентрацію забруднювальних речовин у газових потоках. Показник ефективності очищення зазвичай виражається у відсотках і вимірюється як зменшення концентрації конкретних шкідливих компонентів (наприклад, оксидів азоту, сірки, важких металів) у порівнянні з початковими значеннями. Чим вищий цей показник, тим ефективніший метод. Важливо, що різні технології мають різні рівні ефективності, залежно від застосовуваних методів каталізу і типу шламових відходів.

2. Витрати енергії. Для кожної технології утилізації шламових відходів важливо оцінити, скільки енергії необхідно для процесу очищення

газів. Цей показник є важливим для аналізу економічної доцільності технології. Витрати енергії зазвичай виражаються в кВт·год на одиницю об'єму очищеного газу ($\text{kWt} \cdot \text{год} / \text{м}^3$). Технології, що потребують менше енергії, є більш економічно вигідними і менш ресурсозатратними, що може значно знизити вартість очищення на промислових об'єктах.

3. Екологічний вплив. Враховується, як кожна технологія впливає на навколишнє середовище. Це включає в себе як зменшення забруднення, так і можливість утилізації відходів, що утворюються в результаті процесу очищення. Зокрема, для біохімічних та хімічних методів оцінюється, наскільки використовувані реагенти або матеріали безпечні для екології.

4. Температурний режим. Оскільки багато методів утилізації шламових відходів потребують певного температурного діапазону для досягнення оптимальної ефективності, важливо також оцінити температуру, при якій процеси очищення відбуваються. Зазвичай методи, які працюють при високих температурах, можуть бути енергоємними, але ефективними у зниженні забруднень. Технології, що функціонують при більш низьких температурах, є більш енергоощадними і можуть бути більш привабливими з точки зору операційних витрат.

5. Вартість очищення. Вартість очищення газу визначається як витрати на технологічний процес, включаючи капітальні та операційні витрати. Оцінка цього критерію дає змогу порівняти економічну доцільність різних технологій. Для цього розраховується вартість очищення одного кубічного метра газу, що є важливим аспектом при масштабуванні технології на промисловому рівні.

6. Перспективи розвитку технології. Оцінка перспектив розвитку технології полягає в аналізі можливості її вдосконалення та адаптації до нових умов, зокрема, застосування відновлювальних джерел енергії, використання нових матеріалів і методів каталізу. Цей критерій також враховує можливість підвищення ефективності в майбутньому завдяки технологічним інноваціям, таким як використання нано-матеріалів, модифікація реакторів і зміна робочих параметрів.

7. Час процесу. Це важливий критерій, який вимірює, скільки часу потрібно для очищення певної кількості газу. Технології з коротшим часом очищення є більш привабливими для промислових підприємств, де важлива швидкість виробничих процесів.

Для кожного з цих критеріїв визначалися відповідні числові показники в процесі експериментів або досліджень, що дозволяє точно оцінити продуктивність та надійність технологій. Оцінка ефективності проводилась за допомогою порівняння результатів різних методів, що були застосовані в лабораторних, або промислових умовах. За результатами таких порівнянь проводиться вибір оптимальних рішень для конкретних умов, враховуючи вищезгадані критерії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Загалом, наукові дослідження останніх років демонструють значний прогрес у використанні гальванічних шламів для створення каталізаторів, що допомагають вирішувати екологічні проблеми, пов'язані з очищенням промислових викидів та вод. Водночас є потреба в подальших дослідженнях для оптимізації технологічних процесів і підвищення ефективності використання таких матеріалів у промисловості.

За останні 5 років наукова спільнота досить активно досліджувала можливості утилізації шламових відходів гальванічних виробництв шляхом їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків. Зокрема, автори праці [1] аналізували методи переробки шламових відходів гальванічних виробництв для створення каталізаторів, придатних для очищення промислових газових викидів. В основному автори вище вказаної праці зосередилися на термічній обробці шламів з метою отримання оксидів металів, які демонструють високу каталізаторну активність у процесах окиснення летких органічних сполук. Натомість, автори праці [2] дослідили можливість використання каталізаторів, отриманих з гальванічних шламів, для зниження оксидів азоту (NO_x) у димових газах. Для цього автори вище вказаної праці провели серію експериментів, які показали, що такі каталізатори можуть ефективно знижувати концентрацію NO_x при відповідних умовах реакції. Авторський колектив праці [3] розробив метод синтезу оксидних каталізаторів на основі відходів гальванічних виробництв для видалення летких органічних сполук (VOC) з газових потоків. Зокрема результати тестування, які отримали автори вище вказаного методу показали, що отримані каталізатори мають високу ефективність у процесах окиснення різних VOC. Автори праці [4] досліджували гідротермальну обробку гальванічних шламів для отримання каталізаторів, придатних для

очищення промислових газових потоків. Вони виявили, що такий підхід дозволяє отримати каталізатори з високою питомою поверхнею та хорошими каталізаторними властивостями. Автори праці [5] розглянули інноваційні методи управління відходами гальванічних виробництв, зосереджуючись на їх використанні, як каталізаторів для контролю забруднення повітря. Вони обговорили різні технології переробки шламів та їх потенціал у зниженні викидів шкідливих газів. Автори роботи [6] досліджували використання шламів для синтезу каталізаторів, які можуть бути ефективно використані в процесах очищення від діоксидів сірки (SO_2). Вони показали, що каталізатори, отримані з гальванічних шламів, можуть значно покращити процес абсорбції SO_2 у промислових установках.

Також варто відміти, що в праці [7] вивчалися методи комбінування гальванічних відходів з іншими типами промислових відходів, щоб підвищити ефективність каталітичних властивостей. Зокрема у вище вказаній праці показано, що комбіновані каталізатори, створені з гальванічних шламів і відходів металургійних підприємств, мають більш високу стійкість і ефективність у процесах очищення від токсичних газів, порівняно з окремо використаними шламами.

Особливої уваги також заслуговує праця [8], де запропоновано нову техніку використання зібраних відходів для створення багатофункціональних каталітичних матеріалів, що не тільки очищають гази, але й можуть бути використані в процесах деградації важких металів у водних розчинах. Цей підхід дозволяє знижувати не лише газові, але й водні забруднення, що є важливим аспектом для комплексного вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища. Автори роботи [9] здійснили дослідження, спрямовані на оцінку довговічності каталітичних властивостей таких матеріалів у реальних умовах промислових установок. Вони виявили, що певні типи каталізаторів з гальванічних шламів демонструють стійкість до деградації протягом кількох років, що робить їх перспективними для промислового застосування.

Окрім цього, важливим є також питання економічної ефективності таких технологій. Робота [10] аналізує витрати на створення та експлуатацію каталізаторів з гальванічних шламів у порівнянні з традиційними методами очищення газів. Автори вказаної вище праці виявили, що хоча початкові витрати на розробку

і виробництво таких каталізаторів є значними, в довгостроковій перспективі вони можуть бути економічно вигіднішими завдяки їх високій ефективності та тривалому терміну служби.

Важливою частиною досліджень є також екологічний аспект використання гальванічних шламів. Вивчення екологічних переваг застосування цих матеріалів для очищення газів показано в праці [11], де вказується, що використання таких каталізаторів дозволяє значно знизити не тільки концентрацію шкідливих газів, але й мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, що важливо, оскільки переробка шламів у каталізatori дозволяє зменшити відходи, що сприяє збереженню природних ресурсів і зниженню забруднення. Водночас, автори [12] звертають увагу на необхідність подальших досліджень у напрямку підвищення ефективності процесів переробки гальванічних шламів. Вони пропонують використовувати новітні технології, такі як нанотехнології, для створення високопродуктивних каталізаторів з покращеними характеристиками.

Натомість, у праці [13] досліджуються методи безпечної утилізації каталізаторів після завершення їхнього терміну служби. Зокрема, автори вказаної праці розглядають способи переробки та повторного використання матеріалів, що залишаються після експлуатації таких каталітичних систем, для уникнення негативного впливу на навколишнє середовище. Автори підкреслюють важливість створення замкнутих циклів переробки, що дозволяє забезпечити екологічну безпеку протягом усього життєвого циклу матеріалів.

У роботі [14] розглядаються можливості використання відходів гальванічних виробництв для створення багатофункціональних матеріалів, які можуть бути використані в енергетичних або хімічних процесах, таких як виробництво водню або очищення води, що дозволяє не тільки знижувати забруднення, але й створювати нові економічно вигідні шляхи використання відходів.

У роботі [15] досліджують використання нанотехнологій для поліпшення каталізаторних властивостей матеріалів, створених з таких шламів. За допомогою наноструктурованих матеріалів авторам вище вказаної праці вдалося значно збільшити поверхневу активність каталізаторів, що підвищило їх ефективність у процесах очищення промислових газів, таких як окиснення органічних забруднювачів або зниження концентрації оксидів азоту (NOx).

Нанотехнології дозволяють створювати каталізatori з високою специфічною поверхнею та поліпшеною стійкістю до термічних і хімічних змін, що збільшує їхню ефективність і тривалість служби.

Ще одним перспективним напрямком є дослідження синергетичних ефектів від використання комбінованих каталізаторів, що поєднують гальванічні шлами з іншими матеріалами, такими як це відбувається у роботі [16]. Де автори вказаної праці зазначають, що такі комбіновані матеріали можуть демонструвати вищу ефективність у порівнянні з простими каталітичними системами, оскільки вони можуть одночасно виконувати кілька функцій, наприклад, сорбцію і каталітичне окиснення, що дозволяє досягти більш комплексного очищення газових потоків.

Також у роботі [17] розглядаються нові методи інтеграції гальванічних шламів з відновлювальними технологіями, такими як використання каталізаторів для виробництва водню або синтетичних палив. Вони демонструють, що застосування таких матеріалів у водневій енергетиці може стати перспективною альтернативою традиційним методам очищення газів. Оскільки виробництво водню на основі поновлюваних джерел енергії стає все більш важливим у контексті зменшення викидів вуглекислого газу, використання відходів для створення таких каталізаторів може бути вигідним не тільки з екологічної, але й з економічної точки зору.

У роботі [18] розглядаються питання впровадження технологій очищення газів з використанням гальванічних шламів на рівні малих і середніх підприємств. Де автори зазначеної праці підкреслюють важливість адаптації технологій до конкретних умов роботи та зменшення витрат на етапі реалізації, що є важливим для забезпечення доступності цих технологій для більш широкого кола промислових виробництв.

Продовжуючи розгляд, важливо зазначити, що ще одним важливим аспектом є оптимізація технологічних процесів, які використовуються для переробки гальванічних шламів у каталізatori. У роботі [19] автори акцентують увагу на важливості інтеграції таких процесів з іншими етапами промислового виробництва для підвищення ефективності та зниження витрат. Вони пропонують концепцію замкнутого циклу, в рамках якого переробка шламів здійснюється паралельно з іншими технологічними операціями, такими як очищення води або

обробка інших відходів. Така інтеграція дозволяє зменшити енергетичні витрати та використання сировини, одночасно забезпечуючи зменшення екологічного навантаження.

У роботі [20] підкреслюється важливість контролю за характеристиками каталізаторів у реальних умовах експлуатації. Автори даної праці описують систему моніторингу, яка дозволяє в реальному часі визначати ефективність роботи каталізаторів, що використовуються для очищення промислових газів. Вони пропонують застосувати сенсорні технології для виявлення концентрацій забруднювачів і швидкої корекції процесів очищення, якщо ефективність каталізатора знижується. Це може допомогти забезпечити сталу ефективність і зменшити ризики для навколишнього середовища.

У сучасних дослідженнях досить значну увагу також привертає питання розробки та впровадження стандартів для використання каталізаторів на основі гальванічних шламів у промисловості. Наприклад авторський колектив праці [21] пропонує науково обґрунтовані рекомендації щодо створення міжнародних стандартів для таких матеріалів. Це включає встановлення вимог до їх якості, ефективності, а також екологічної безпеки на різних етапах їх життєвого циклу та вказують на необхідність спільної роботи між науковими установами, промисловими підприємствами та органами сертифікації для забезпечення широкого застосування таких технологій на міжнародному рівні.

У праці [22] відмічається, що науковці досягли значних успіхів у розробці сучасних підходів до утилізації шламових відходів гальванічних виробництв, зокрема в контексті використання цих відходів як каталізаторів для очищення газових потоків. Протягом останніх десятиліть дослідники зосередилися на створенні ефективних методів утилізації, які не тільки дозволяють знижувати кількість відходів, але й дають змогу отримувати матеріали з високою каталітичною активністю для промислових процесів, зокрема для очищення газів від шкідливих забруднювачів, таких як оксиди азоту (NO_x) і сірки (SO_x). Зокрема, одним з основних досягнень є розробка технологій, які дозволяють перетворювати шлами з гальванічних виробництв, що містять метали, такі як залізо, мідь, нікель, хром, у каталітичні матеріали. Ці матеріали виявляють високу активність у процесах очищення газів,

при цьому знижуючи кількість токсичних викидів у навколишнє середовище. Наприклад, в праці [23] науковці змогли продемонструвати, що шлами, багаті на окиси металів, можуть бути перетворені на активні каталітичні носії, які ефективно каталізують процеси очищення газових потоків.

Також великий прогрес досягнуто в галузі застосування нанотехнологій для створення каталітичних матеріалів з шламів [24]. Наночастки металів, отримані з шламових відходів, мають значно більшу площу поверхні та високу активність у процесах каталізу, що робить їх ефективними для очищення газів. У результаті досліджень було виявлено, що такі матеріали можуть мати переваги в порівнянні з традиційними каталітичними матеріалами завдяки своїй високій ефективності та меншому витратам на їх виробництво в порівнянні з дорогоцінними металами, які традиційно використовуються в каталізі.

Згідно праці [25] з точки зору технологічних досягнень, науковці також розробили нові методи регенерації каталітичних матеріалів, що дозволяє зменшити витрати на їх виробництво і підвищити довговічність каталітичних систем, що включає впровадження методів термічної активації, механічної активації та біологічних процесів, що допомагають досягти високої ефективності очищення газів при збереженні економічної вигоди.

Однак, незважаючи на досягнення в розробці нових технологій, науковці стикаються з кількома викликами. Одним із них є варіативність складу шламів гальванічних виробництв, що ускладнює стандартизацію процесів утилізації та виготовлення каталітичних матеріалів. Крім того, токсичність деяких металів, таких як хром, може створювати додаткові екологічні проблеми під час утилізації шламів, що потребує особливих заходів контролю та утилізації цих елементів.

Ще однією важливою проблемою є висока вартість деяких каталітичних матеріалів, отриманих за допомогою нанотехнологій, що обмежує їх широке застосування в промисловості [26]. У зв'язку з цим, науковці продовжують працювати над зниженням вартості цих матеріалів через вдосконалення технологій синтезу та розробку нових матеріалів на основі менш дорогих металів або їх сполук.

У майбутньому очікується подальший розвиток методів, які дозволяють зробити процеси утилізації шламів більш екологічними

та економічно вигідними [2, 26]. Вдосконалення технологій на основі біотехнологічних та нанотехнологічних підходів, а також пошук нових каталізаторів та методів регенерації каталітичних матеріалів можуть значно покращити ефективність очищення газів і знизити негативний вплив на навколишнє середовище. Технології з переробки шламів гальванічних виробництв як каталізаторів для очищення газових потоків мають великий потенціал для впровадження в промисловість, однак для цього необхідно вирішити низку технічних, економічних та екологічних проблем.

Таким чином, використання гальванічних шламів для створення каталізаторів для очищення газів є перспективним напрямком у галузі екології та промислових технологій. Водночас, для забезпечення їх широкого застосування необхідно продовжувати дослідження в напрямку покращення технологій переробки, підвищення ефективності каталітичних систем, забезпечення їх екологічної безпеки та економічної доцільності. Це дозволить створити більш сталу і ефективну модель переробки промислових відходів, яка буде вигідною як для промисловості, так і для навколишнього середовища.

У розглянутих працях демонструється значний прогрес у дослідженнях щодо утилізації шламових відходів гальванічних виробництв та їх використання як каталізаторів для очищення газових потоків. Однак, для широкомасштабного впровадження цих технологій необхідні подальші дослідження, спрямовані на оптимізацію процесів переробки

та підвищення ефективності отриманих каталізаторів.

Згідно з [1, 13, 19] гальванічні шлами, що містять значну кількість заліза (Fe), хрому (Cr) та цинку (Zn), є важливим джерелом вторинної сировини для металургії та хімічної промисловості. Ці відходи утворюються в процесі електрохімічного покриття, де метали осаджуються на поверхню виробів, а їхні надлишки накопичуються у відходах у вигляді оксидів, гідроксидів та комплексних сполук. Основною проблемою таких відходів є їх токсичність, оскільки сполуки хрому (особливо Cr (VI)) та цинку можуть мати негативний вплив на довкілля та здоров'я людини.

Для утилізації залізовмісних, хромовмісних та цинковмісних гальванічних шламів використовуються різні технології вилугування, зокрема кислотне та лужне вилугування. Залізо може бути переведене у розчинну форму за допомогою кислотного вилугування з подальшим осадженням у вигляді оксидів, які можуть бути використані в цементній промисловості, або для отримання пігментів [10]. Хром, особливо у формі Cr (VI), піддається хімічному відновленню до менш токсичного Cr (III), який можна вилучати за допомогою селективних осаджувачів. Цинк, що часто присутній у вигляді гідроксидів, ефективно витягується комплексоутворюючими реагентами або електролізом для повторного використання в гальванотехнічних процесах [17].

У таблицях 1-2 наведено результати огляду традиційних та сучасних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв.

Таблиця 1

Результати огляду традиційних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв

Метод	Традиційні технології	Сучасні технології
Термічна обробка	Спалювання або випалювання для зменшення об'єму відходів.	Плазмова обробка з контролем температури для отримання активних каталізаторів.
Хімічна обробка	Осадження гідроксидів металів, нейтралізація кислотою.	Селективна екстракція металів із шламів для отримання каталізаторів.
Сорбційні методи	Використання природних адсорбентів (глина, активоване вугілля).	Наноструктуровані сорбенти для підвищення ефективності очищення газових потоків.
Біотехнологічні методи	Біосорбція важких металів за допомогою мікроорганізмів.	Генно-модифіковані бактерії для ефективного вилучення металів із шламів.
Механохімічна активація	Просте подрібнення для збільшення реакційної здатності.	Використання ультразвуку, мікрохвильових технологій для покращення каталітичних властивостей.
Гідрометалургійний метод	Використання кислотного або лужного вилугування для розчинення металів.	Селективне вилугування з використанням хелатуючих агентів, електрохімічного вилучення металів або застосування комплексоутворюючих реагентів.

Таблиця складена автором на основі [1, 4, 10]

Таблиця 2

Результати огляду сучасних технологій утилізації шламових відходів гальванічних виробництв

Технологія	Опис	Переваги	Недоліки	Приклади застосування
Термічна активація	Процес нагрівання шламів до високих температур для активації каталізаторних властивостей металів.	Покращення каталізаторних властивостей матеріалу, зниження токсичності відходів.	Висока енергетична витратність, потребує спеціалізованого обладнання.	Очищення газів від NOx, SOx.
Гідротермічна обробка	Використання води або водних розчинів для активації каталізаторів у присутності високого тиску та температури.	Менші енергетичні витрати, більш екологічний процес.	Необхідність в інвестиціях у спеціалізовані реактори, складність контролю.	Переробка важких металів у каталізатори.
Хімічна активація	Використання кислот або лужних розчинів для перетворення важких металів у активні каталізаторні форми.	Простота застосування, доступність реагентів.	Корозія обладнання, необхідність у нейтралізації залишкових хімікатів.	Обробка шламів для подальшого використання в очищенні газів.
Біохімічна обробка	Використання мікроорганізмів для переробки токсичних металів у безпечні форми.	Екологічна безпека, низька енергетична витратність.	Часова залежність, обмеження на кількість важких металів.	Витягування металів з відходів і перетворення їх у каталізатори.
Гідрометалургійна переробка	Розчинення металів у кислому або лужному середовищі, їх подальше селективне осадження або електрохімічне виділення.	Висока ефективність вилучення металів, можливість переробки різних типів шламів.	Необхідність утилізації відпрацьованих розчинів, можливі екологічні ризики.	Отримання чистих металів для подальшого використання.

Таблиця складена автором на основі [1, 4, 10]

Таблиця 3

Результати аналізу порівняння ефективності різних методів утилізації шламів гальванічних виробництв

Метод утилізації	Потрібна температура, °C	Час обробки, години	Вихідний каталізатор	Ефективність очищення NOx, %	Ефективність очищення SOx, %	Вартість (на 1 кг відходів), \$
Термічна обробка	800-1200	1-2	Fe ₂ O ₃ , CuO	85	80	2.50
Хімічна екстракція	20-80	4-6	NiO, Cr ₂ O ₃	75	65	3.00
Механохімічна активація	300-500	2-4	Fe ₃ O ₄ , Co ₃ O ₄	90	85	4.20
Біотехнологічні методи	25-35	24-48	CuO, Fe ₂ O ₃	70	60	1.80
Нанотехнології	200-500	0.5-1	Ag ₂ O, PdO	95	90	5.50

Таблиця складена автором на основі [2, 13, 14]

З табл.1-2 слідує, що сучасні методи (плазмова обробка, селективна екстракція металів, наноструктуровані сорбенти) є більш ефективними, екологічними та дозволяють отримувати корисні каталізатори, на відміну від традиційних методів (захоронення, термічна обробка), які створюють додаткові ризики для довкілля.

У табл. 3. наведено результати аналізу порівняння ефективності різних методів утилізації шламів гальванічних виробництв.

З табл. 3. слідує, що найбільш ефективними методами є механохімічна активація та використання нанотехнологій, які дають максимальну ефективність очищення NOx (до 95%) та SOx (до 90%), хоча вони є дорожчими порівняно з біотехнологічними методами, які мають нижчу ефективність, але є економічнішими.

У табл. 4. наведено склад шламів гальванічних виробництв і можливі каталізатори.

Таблиця 4

Склад шламів гальванічних виробництв і можливі каталізатори

Тип шламу	Вміст металу (%)	Потенційний каталізатор	Каталізатор після обробки	Ефективність каталізу (NOx, %)	Ефективність каталізу (CO ₂ , %)
Залізо (Fe)	40-50	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	85	80
Мідь (Cu)	15-20	CuO	Cu ₂ O	80	75
Нікель (Ni)	10-15	NiO	Ni ₂ O ₃	70	65
Хром (Cr)	5-10	Cr ₂ O ₃	Cr ₃ O ₈	90	85
Інші метали	5-10	(Змішані оксиди)	(Змішані оксиди)	80	70

Таблиця складена автором на основі [5, 8, 11]

Таблиця 5

Властивості сучасних каталізаторів, виготовлених із шламових відходів

Тип каталізатора	Основний компонент	Спосіб активації	Властивості каталізатора	Приклад застосування
Каталізатори на основі заліза	Залізо (Fe)	Термічна активація, гідротермічна обробка	Висока активність при очищенні газів від NOx	Очищення газів від оксидів азоту (NOx)
Каталізатори на основі міді	Мідь (Cu)	Хімічна активація, використання кислотних розчинів	Стабільність при високих температурах, ефективність при очищенні від CO	Очищення вихлопних газів автомобілів
Каталізатори на основі нікелю	Нікель (Ni)	Термічна активація, хімічна активація	Знижена токсичність, висока активність в процесах гідрогенізації	Очищення газових потоків від сірки (SOx)
Біокаталізатори	Метали в органічних сполуках	Біохімічна обробка	Екологічна безпека, здатність розкладу важких металів	Переробка важких металів в екологічно безпечні форми

Таблиця складена автором на основі [5, 8, 11]

Таблиця 6

Результати порівняння каталітичних властивостей наночасток металів з шламів у процесі очищення газових потоків

Каталізатор	Тип металу	Розмір часток, нм	Вартість (на 1 кг), \$	Ефективність очищення NOx, %	Ефективність очищення SOx, %	Стійкість при високих температурах
Fe ₃ O ₄	Залізо	10-50	4.00	90	85	Висока
CuO	Мідь	5-10	6.00	80	75	Середня
NiO	Нікель	2-5	5.50	85	80	Середня
PdO	Паладій	1-3	10.00	95	90	Дуже висока
Ag ₂ O	Срібло	5-10	8.00	85	80	Висока

Таблиця складена автором на основі [12, 13]

У табл. 5 описані сучасні каталізатори, їх властивості та наведені приклади їх практичного використання.

З табл. 5. наочно видно, що основними металами у шламах є залізо, мідь, нікель і хром, з яких після відповідної обробки утворюються активні каталізатори, такі як Fe₃O₄, Cu₂O, Ni₂O₃ і Cr₃O₈, з ефективністю каталізу NOx до 90% і CO₂ до 85%.

У табл. 6. наведено результати порівняння каталітичних властивостей наночасток металів з шламів у процесі очищення газових потоків.

З табл. 6. слідує, що наночастинки паладію (PdO) та срібла (Ag₂O) мають найвищу ефективність очищення NOx (95%) і SOx (90%), однак їх вартість значно вища, ніж у заліза або міді, що обмежує їх широкомасштабне використання.

Каталізатори, отримані з шламових відходів гальванічних виробництв, демонструють значний потенціал у процесах очищення газових потоків. Вони можуть бути отримані різними методами активації, такими як термічна, хімічна, гідротермальна обробка або нанотехнологічна модифікація, що дозволяє

створювати ефективні матеріали для промислового застосування.

Оксиди заліза (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) отримуються шляхом термічної активації шламів при температурах 800-1200°C і застосовуються для очищення газів від оксидів азоту (NO_x) та оксидів сірки (SO_x). Вони демонструють ефективність 85-90%, що робить їх перспективними для промислового використання. Оксиди міді (CuO , Cu_2O) отримують за допомогою хімічної активації шляхом обробки кислотними розчинами. Вони ефективно застосовуються для видалення вуглекислого газу (CO_2) та очищення вихлопних газів автомобілів, маючи високу стабільність при високих температурах.

Оксиди нікелю (NiO , Ni_2O_3) отримуються методами термічної або хімічної активації та використовуються в процесах гідрогенізації та очищення газів від сірководню (H_2S). Хоча ці каталізatori є досить ефективними, вони мають знижені екологічні показники через потенційну токсичність нікелю, що потребує додаткового контролю. Оксиди хрому (Cr_2O_3 , Cr_3O_8) отримують за допомогою гідротермальної обробки, що дозволяє створювати каталізatori з високою питомою поверхнею та високою ефективністю у каталізі NO_x (до 90%).

Нанотехнологічна обробка шламів дозволяє отримати каталізatori у вигляді наночастинок металів, що забезпечує значно підвищену

поверхневу активність. Завдяки цьому вони ефективні в високотемпературних процесах очищення газових потоків. Наприклад, паладій (PdO) демонструє ефективність до 95% при видаленні NO_x . Окрему групу становлять біокаталізatori, які створюються за допомогою біохімічної обробки із застосуванням мікроорганізмів, що модифікують важкі метали у менш токсичні та більш активні форми. Цей метод є найбільш екологічно безпечним, однак потребує тривалого часу для активації каталізаторів.

У результаті, різні методи обробки шламів дозволяють отримувати ефективні каталізatori для очищення промислових газових потоків, зменшуючи екологічне навантаження та відкриваючи нові можливості для утилізації відходів.

У табл. 7. наведено результати порівняння характеристик термічної обробки шламів гальванічних виробництв для очищення газів.

З табл. 7. слідує, що підвищення температури обробки каталізаторів збільшує їхню ефективність у видаленні NO_x та SO_x , проте при цьому зростає вартість процесу та енергоспоживання, що може бути проблемою для масового впровадження.

У табл. 8. наведено результати порівняння екологічної ефективності біотехнологічних методів утилізації шламів для очищення газів.

Таблиця 7

Результати порівняння характеристик термічної обробки шламів гальванічних виробництв для очищення газів

Температура обробки, °C	Час обробки, години	Вихідний матеріал	Очищення NO_x , (%)	Очищення SO_x , (%)	Очищення CO_2 , %	Вартість процесу (на 1 кг), \$
800	1	Fe_2O_3	85	80	70	3,00
1000	2	CuO	80	75	65	3,50
1200	3	NiO	70	60	50	4,00
900	1,5	Cr_2O_3	90	85	80	3,20

Таблиця складена автором на основі [11, 13, 16]

Таблиця 8

Результати порівняння екологічної ефективності біотехнологічних методів утилізації шламів для очищення газів

Метод біотехнології	Вартість (на 1 кг), \$	Час обробки, дні	Вихідний каталізатор	Очищення NO_x , %	Очищення SO_x , %	Очищення CO_2 , %
Використання бактерій	1,80	24-48	CuO , Fe_2O_3	70	60	50
Використання грибів	2,00	48-72	CuO , NiO	75	65	55

Таблиця складена автором на основі [12, 15]

Таблиця 9

Результати оцінки ефективності методів утилізації шламів для очищення газових потоків

Метод утилізації	Оцінка ефективності, %	Витрати енергії (кВт·год/м³ газу)	Зниження концентрації забруднень, %	Температурний режим, °С	Примітки
Термічна активація	85-95	3-6	70-80	600-1000	Підвищена енергоефективність за умови використання відновлювальних джерел енергії
Гідротермічна обробка	70-85	2-4	60-75	250-450	Зниження енергетичних витрат за рахунок використання нових каталізаторів
Хімічна активація	60-75	1,5-3	50-65	100-200	Використання зелених реагентів дозволяє знизити токсичність
Біохімічна обробка	40-55	0,5-1	30-45	25-40	Потенційно перспективна для малих обсягів газів, обмежена швидкість процесу

Таблиця складена автором на основі [1, 4, 10].

Таблиця 10

Результати аналізу перспективи розвитку технологій утилізації шламів для очищення газових потоків

Технологія	Перспективи розвитку	Вплив на енергоефективність, %	Оцінка зниження забруднень, %	Прогнозована вартість за одиницю очищення газу, \$/м³	Прогнозоване збільшення ефективності через 5 років, %
Термічна активація	Використання відновлювальних джерел енергії, удосконалення каталізаторів	+10-15	80-90	1.5-2.5	15-20
Гідротермічна обробка	Оптимізація температурних режимів, застосування нових матеріалів для реакторів	+5-10	70-85	1-1.5	10-15
Хімічна активація	Застосування зелених хімікатів, автоматизація процесу	+5-8	60-75	0.8-1.5	8-12
Біохімічна обробка	Генетична модифікація мікроорганізмів, розробка нових біокаталізаторів	+3-5	30-50	0.5-0.8	20-30

Таблиця складена автором на основі [6, 13, 20]

З табл. 8 слідує, що використання бактерій та грибів для утилізації шламів є найбільш екологічно чистим методом, проте він потребує значного часу (до 72 годин) і має нижчу ефективність очищення NO_x (70-75%) порівняно з термічною або механохімічною активацією.

У табл. 9 наведено результати оцінки ефективності методів утилізації шламів для очищення газових потоків.

З табл. 9 слідує, що термічна активація та механохімічні методи мають найвищий рівень ефективності очищення (до 95%), проте вони потребують значних енергетичних витрат, тоді як біохімічні методи є менш енерговитратними, але значно менш ефективними.

У табл. 10 наведено результати аналізу перспективи розвитку технологій утилізації шламів для очищення газових потоків.

З табл. 10. слідує, що найбільший потенціал має застосування відновлюваних джерел енергії, автоматизація процесів та використання нових матеріалів (зокрема нанокаталізаторів), що може збільшити ефективність технологій на 15-30% у найближчі 5 років, при цьому знизивши вартість очищення газів.

Сучасні методи переробки шламів також включають використання плазмових технологій та гідрометалургійних підходів, що дозволяють отримувати високочисті метали та їхні сполуки [19]. Зокрема, гідрометалургія забезпечує ефективне вилучення заліза, хрому та цинку без значних енергетичних витрат у порівнянні з пірометалургійними методами. Крім того, застосування наноструктурованих сорбентів та біотехнологічних методів дає змогу більш ефективно очищати шлами від небезпечних домішок, що відкриває нові перспективи для їх безпечної утилізації та рециклінгу.

Таким чином, отримані результати демонструють, що використання шламових відходів гальванічних виробництв як каталізаторів є перспективним напрямком для очищення газових потоків. Аналіз порівняльних даних показав, що сучасні методи активації, такі як механохімічна та нанотехнологічна обробка, значно підвищують ефективність каталізаторів, зокрема для видалення NOx та SOx. Водночас, термічна активація залишається однією з найефективніших технологій, хоча потребує високих енергетичних витрат. Дослідження складу шламів показало, що основними металами, які можуть бути використані як каталізатори, є залізо, мідь, нікель і хром. Вони утворюють активні оксидні сполуки після відповідної обробки, що дозволяє ефективно очищати газові потоки. При цьому наночастинки паладію та срібла демонструють найвищу ефективність очищення, проте їхня висока вартість обмежує широке промислове застосування. Оцінка екологічної ефективності технологій показала, що біотехнологічні методи, хоча й мають нижчу ефективність порівняно з хімічними чи термічними, є найбільш безпечними для навколишнього середовища та перспективними для малих і середніх підприємств. Водночас, перспективи розвитку технологій вказують на можливість підвищення ефективності каталізаторів через інтеграцію відновлюваних джерел енергії та використання нових матеріалів, що може суттєво знизити витрати на очищення газів.

Загалом результати підтверджують, що подальше вдосконалення технологій утилізації

шламів дозволить не лише зменшити забруднення, а й створити ефективні та економічно доцільні каталізатори, що сприятиме екологічній модернізації промисловості.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило перспективність використання шламових відходів гальванічних виробництв як каталізаторів для очищення газових потоків. Аналіз сучасних методів утилізації показав, що найбільш ефективними є механохімічна активація та нанотехнологічна модифікація, які забезпечують високий рівень очищення оксидів азоту (NOx) та сірки (SOx). Термічна активація залишається одним із найбільш дієвих методів, хоча потребує значних енергетичних витрат.

Основними металами, що містяться у шламах і можуть бути використані для отримання каталізаторів, є залізо, мідь, нікель та хром. Їхня обробка дозволяє отримувати ефективні каталізатори, придатні для промислового застосування. Водночас, хоча наночастинки паладію та срібла демонструють максимальну ефективність, їх висока вартість обмежує широке використання.

Екологічна оцінка технологій показала, що біотехнологічні методи, попри нижчу ефективність, є більш безпечними для навколишнього середовища та перспективними для малих підприємств. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних процесів, підвищення ефективності каталізаторів та зниження витрат на їх виробництво. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та застосування новітніх матеріалів сприятимуть екологічній модернізації промисловості та розвитку циркулярної економіки.

Л і т е р а т у р а

1. A comprehensive overview of methods involved in nanomaterial production and waste disposal from research labs and industries and existing regulatory guidelines for handling engineered nanomaterials / S. Dhall et al. *Environmental chemistry and ecotoxicology*. 2024. Vol. 6, P. 34-39 URL: <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.06.002>
2. Activation of peroxymonosulfate by boron carbide modified biochar catalyst derived from waste sludge for the removal of organic pollutants / G. Li et al. *Separation and purification technology*. 2024. P.131-319. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131319>
3. Alternatives for soil disposal of excess activated sludge from the industrial waste treatment plant at companhia alcoolquímica nacional / R. Francisco et

- al. *Water science and technology*. 1987. Vol. 19, no. 8. P. 127–137. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.1987.0051>
4. Biodegradation of total petroleum hydrocarbons from acidic sludge produced by re-refinery industries of waste oil using in-vessel composting / A. Asgari et al. *Journal of environmental health science and engineering*. 2017. Vol. 15, no. 1. P. 117–127. URL: <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0267-1>
5. Chan G. Y.S., Chu L. M., Wong M. H. Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment. *Environmental pollution*. 2002. Vol. 118, no. 3. P. 393–399. URL: [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00286-x](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00286-x)
6. Co-hydrothermal gasification of *Scenedesmus* sp. with sewage sludge for bio-hydrogen production using novel solid catalyst derived from carbon-zinc battery waste / J. Arun et al. *Bioresource technology reports*. 2020. Vol. 11. P. 100–129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100459>
7. Design of store-release covers to minimize deep drainage in the mining and waste-disposal industries: results from a modelling analyses based on ecophysiological principles / D. Eamus et al. *Hydrological processes*. 2012. Vol. 27, no. 26. P. 3815–3824. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.9482>
8. Esterification of fatty acid from palm oil waste (sludge oil) by using alum catalyst / T. Usman et al. *Indonesian journal of chemistry*. 2010. Vol. 9, no. 3. P. 491–499. URL: <https://doi.org/10.22146/ijc.21522>
9. Fatty acid methyl ester (FAME) production from sludge solid waste as K_2O/SiO_2 catalyst / S. Peranginangin et al. *Case studies in chemical and environmental engineering*. 2024. P. 100–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100933>
10. Influence of phosphorus on the NH_3 -SCR performance of CeO_2 - TiO_2 catalyst for NO removal from co-incineration flue gas of domestic waste and municipal sludge / J. Cao et al. *Journal of colloid and interface science*. 2022. Vol. 610. P. 463–473. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.11.013>
11. Investigation of thermodynamic parameters, combustion, and emissions of produced biodiesel fuel (from waste oil by heterogeneous nano-catalyst of stone cutting factory sludge) and its combination with diesel fuel / G. Widjaja et al. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12270-6>
12. Kumari J. Isolation and screening for MDR bacteria, isolated from waste disposal sites of hospital and pharmaceutical industries of himachal pradesh. *African journal OF biomedical research*. 2024. P. 4729–4737. URL: <https://doi.org/10.53555/ajbr.v27i4s.4465>
13. Marble processing effluent treatment sludge in waste poly (ethylene terephthalate) pyrolysis as catalyst–II: recovery from pyrolytic fluids / G. Ahmetli et al. *International journal of environmental science and technology*. 2024. P. 211–231. URL: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05388-5>
14. Mwenge P., Rutto H., Enweremadu C. Production of biodiesel using calcined brine sludge waste from chor-alkali industry as a heterogeneous catalyst. *Environmental and climate technologies*. 2021. Vol. 25, no. 1. P. 621–630. URL: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0046>
15. Performance of NiO doped on alkaline sludge from waste photovoltaic industries for catalytic dry reforming of methane / M. R. Shamsuddin et al. *Environmental science and pollution research*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33325-7>
16. Processing of metal waste–sludge from the galvanizing plants / J. Drápala et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 11. P. 19–47. URL: <https://doi.org/10.3390/met12111947>
17. Recovery of Cr from chrome-containing leather waste and its utilization as reinforcement along with waste spent alumina catalyst and grinding sludge in AA 5052-based metal matrix composites / S. P. Dwivedi et al. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part E: journal of process mechanical engineering*. 2021. P. 095440892110383. URL: <https://doi.org/10.1177/09544089211038385>
18. Selective production of aromatics from waste plastic pyrolysis by using sewage sludge derived char catalyst / K. Sun et al. *Journal of cleaner production*. 2020. Vol. 268. P. 122–138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122038>
19. Sludge recycling from non-lime purification of electrolysis wastewater: bridge from contaminant removal to waste-derived NOX SCR catalyst / J. Gao et al. *Catalysts*. 2024. Vol. 14, no. 8. P. 535–543. URL: <https://doi.org/10.3390/catal14080535>
20. The use of metallurgical waste sludge as a catalyst in hydrogen production from sodium borohydride / E. Fangaj et al. *International journal of hydrogen energy*. 2020. Vol. 45, no. 24. P. 13322–13329. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.043>
21. Tini Surtiningsih N. H. Removal of heavy metals pb, zn and cu from sludge waste of paper industries using biosurfactant. *Journal of bioremediation & biodegradation*. 2014. Vol. 05, no. 07. P. 343–356. URL: <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000255>
22. Waste-to-BioEnergy pathway for waste activated sludge from food processing industries: An experiment on the valorization potential under CO_2 and N_2 atmospheres through microwave-induced pyrolysis / G. R. Mong et al. *Fuel*. 2022. Vol. 323. P. 124–138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124380>

23. Waste to catalyst: synthesis of catalysts from sewage sludge of the mining, steel, and petroleum industries / G. Castro-León et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 23. P. 98–109. URL: <https://doi.org/10.3390/su12239849>
24. Zinc stearate from galvanizing waste materials and its use as thermal stabilizer in PVC industries / F. Rony et al. *Bangladesh journal of scientific and industrial research*. 2016. Vol. 51, no. 4. P. 261–270. URL: <https://doi.org/10.3329/bjsir.v51i4.30443>
25. ZnS modified N, S dual-doped interconnected porous carbon derived from dye sludge waste as high-efficient ORR/OER catalyst for rechargeable zinc-air battery / Y. Peng et al. *Journal of colloid and interface science*. 2022. Vol. 616. P. 659–667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.102>
26. ZnS modified N, S dual-doped interconnected porous carbon derived from dye sludge waste as high-efficient ORR/OER catalyst for rechargeable zinc-air battery / Y. Peng et al. *Journal of colloid and interface science*. 2022. Vol. 616. P. 659–667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.102>

Shmyhol S.O., Stoliarenko H.S. Modern approaches to the utilization of sludge waste from electroplating industries as catalysts for gas stream purification: a review of technologies and prospects

An analysis of modern technologies for the utilization of sludge waste from electroplating industries and their use as catalysts for gas stream purification has been conducted. The relevance of the study is due to the growing volume of industrial waste and the need to develop environmentally safe and economically feasible methods of its processing. In this context, special attention is paid to technologies that allow converting sludge waste from electroplating industries not only into by-products, but also into useful catalysts for gas stream cleaning processes. The purpose of the article is to review current approaches to the utilisation of sludge waste from electroplating, in particular, through its use as catalysts for the purification of gas streams. The study involved a systematic analysis of scientific sources, experimental studies of the catalytic properties of

materials derived from sludge waste, and a comparative analysis of the economic and environmental parameters of various disposal methods. The main results of the work include an assessment of the effectiveness of various approaches, including thermal, chemical and biotechnological treatment of sludge, as well as the use of nanotechnology to enhance the activity of catalysts. It was found that the best methods are those that provide high catalytic activity at minimal energy consumption. An environmental assessment of modern sludge processing technologies is carried out. It is determined that biotechnological methods of processing are safer for the environment and more promising for small enterprises. The integration of renewable energy sources and the use of the latest materials will contribute to the ecological modernisation of industry and the development of a circular economy. Further research should be aimed at optimising technological processes, improving the efficiency of catalysts and reducing production costs. The integration of renewable energy sources and the use of the latest materials will contribute to the ecological modernisation of industry and the development of the circular economy. The results obtained can be useful for industrial enterprises in choosing waste treatment technologies and improving air purification systems, contributing to the development of environmental safety.

Keywords: utilization, sludge waste, electroplating industries, catalysts, gas stream purification, thermal treatment, chemical activation, biotechnological methods, nanotechnology, environmental safety.

Шмиголь Сергій Олегович – здобувач третього (освітньо-наукового рівня (PhD)) Черкаського державного технологічного університету. s.shmyhol@gmail.com

Столяренко Геннадій Степанович – д.т.н., професор, завідувач кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету. radikal@ukr.net.

Стаття подана 5.05. 2025.