УДК 628.47:504.064
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.3

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПІДПРИЄМСТВА ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Власенко О.В.[1], **Зудіков А.О.**[2], **Копаниця О.Б.**[1]
[1]Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ
[2]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро
olegvvvv@gmail.com

Розглядаються сучасні технології очищення стічних вод гірничо-металургійної галузі, зокрема механічні, хімічні, фізико-хімічні, термічні та біологічні методи. Кожен з них має свої переваги та обмеження, а також здатність ефективно очищати воду від різних типів забруднювачів, таких як метали, кислоти, нафтопродукти, солі, органічні речовини та суспендовані тверді частинки.

Механічні методи, зокрема, фільтрація та осадження, ефективні в видаленні нерозчинних забруднень, таких як пісок чи пил, але не здатні усувати розчинені речовини. Хімічні методи очищення, включаючи коагуляцію та флокуляцію, дають можливість досягти високого ступеня очищення води, зокрема від важких металів, кислот та органічних забруднювачів. Однак вони вимагають використання хімічних реагентів, що збільшує витрати, а також потребують додаткової обробки осаду, що утворюється в процесі.

Фізико-хімічні методи, такі як адсорбція, електроліз або обробка іонними обмінниками, можуть ефективно видаляти іони металів, органічні забруднювачі та нафтопродукти, що робить їх універсальними для очищення стічних вод. Водночас вони мають певні обмеження в умовах високих концентрацій забруднень. Термічні методи, що включають випарювання та піроліз, добре підходять для видалення органічних забруднювачів, однак вони потребують значних енергетичних витрат і спеціального обладнання.

Біологічні методи очищення, зокрема, аеробна та анаеробна обробка, ефективно розкладають органічні речовини, однак вони менш ефективні для видалення неорганічних забруднень і потребують стабільних умов для роботи.

Вцілому, стаття підкреслює важливість комплексного підходу до очищення стічних вод у гірничо-металургійній промисловості, що дозволяє поєднувати різні методи для досягнення максимальної ефективності у видаленні широкого спектра забруднювачів і забезпечення екологічної безпеки. *Ключові слова:* технології очищення стічних вод, гірничо-металургійний комплекс, забруднювачі, вплив на водні ресурси, забруднювачі.

Analysis of wastewater treatment technologies of a mining and metallurgical complex enterprise. Vlasenko O., Zudikov A., Kopanytsia O.

The article discusses modern wastewater treatment technologies used in the mining and metallurgical industries, specifically mechanical, chemical, physicochemical, thermal, and biological methods. Each of these methods has its own advantages and limitations, as well as the ability to effectively treat water contaminated by various pollutants, including metals, acids, petroleum products, salts, organic substances, and suspended solids.

Mechanical methods, such as filtration and sedimentation, are effective at removing insoluble contaminants like sand or dust but are not capable of eliminating dissolved substances. Chemical treatment methods, including coagulation and flocculation, allow for a high degree of water purification, especially for the removal of heavy metals, acids, and organic pollutants. However, these methods require the use of chemical reagents, which increases costs, and also necessitates further treatment of the resulting sludge.

Physicochemical methods, such as adsorption, electrolysis, or ion exchange, can effectively remove metal ions, organic pollutants, and petroleum products, making them versatile for wastewater treatment. However, they have certain limitations under conditions of high pollutant concentrations. Thermal methods, including evaporation and pyrolysis, are well-suited for the removal of organic contaminants but require significant energy input and specialized equipment.

Biological treatment methods, such as aerobic and anaerobic processes, are efficient at breaking down organic substances; however, they are less effective for removing inorganic pollutants and require stable operational conditions to function optimally.

In general, the article emphasizes the importance of a comprehensive approach to wastewater treatment in the mining and metallurgical industries, which combines various methods to achieve maximum effectiveness in removing a broad range of pollutants and ensuring environmental safety. *Key words:* wastewater treatment technologies, mining and metallurgical complex, pollutants, impact on water resources.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Забруднення водних ресурсів- це одна з найважливіших екологічних проблем сучасності. Гірничо-металургійна промисловість є одним з найбільших джерел стічних вод у світі, генеруючи приблизно 30% від загального обсягу стічних вод, що скидаються з промислових джерел. У деяких країнах, таких як Канада та Австралія, цей показник може досягати 50% від загальної кількості стічних вод у промисловому секторі.

Стічні води, що утворюються на таких підприємствах, містять високі концентрації важких металів, хімічних сполук, твердих частинок та органічних речовин, що робить їх небезпечними для навколиш-

нього середовища та здоров'я людини. Актуальність вивчення проблеми очищення стічних вод гірничо-металургійних підприємств полягає у необхідності запровадження ефективних технологій для зниження негативного впливу на довкілля та забезпечення раціонального використання водних ресурсів.

Особливої уваги потребує дослідження технологій очищення стічних вод, що утворюються в процесах видобутку та збагачення руд, плавлення металів та інших операцій. Це зумовлено тим, що ці води мають специфічний хімічний склад та можуть містити високі концентрації токсичних речовин, таких як мідь, свинець, кадмій, цинк та інші важкі метали.

Окрім того, промислові стоки можуть містити залишки хімічних реагентів, що використовуються для очищення та збагачення руди, а також органічні та неорганічні домішки. За даними Міжнародної ради з металургії (ICMM), близько 50% стічних вод з ГМК скидаються у водойми без належної обробки, що призводить до забруднення річок, озер і ґрунтових вод [6]. Відтак, проблема очищення стічних вод ГМК є важливою для збереження екосистем, водних ресурсів та забезпечення сталого розвитку.

У науковій літературі існує низка робіт, присвячених дослідженню технологій очищення стічних вод промислових підприємств, зокрема в гірничо-металургійному комплексі. Наприклад, Петров досліджує різні підходи до класифікації та обробки стічних вод у ГМК, акцентуючи увагу на методах коагуляції та фільтрації для видалення важких металів [6]. Робота Білоконя присвячена аналізу сучасних технологій очищення промислових стічних вод, таких як мембранні системи та біологічне очищення, що забезпечують більш глибоке видалення забруднень [2]. Шевченко розглядає новітні інноваційні підходи, включаючи використання зворотного осмосу та адсорбційних матеріалів, підкреслюючи їхню ефективність для очищення вод, що містять важкі метали та токсичні сполуки [7].

Актуальність дослідження також обумовлена глобальними тенденціями до зменшення впливу промислового виробництва на екосистеми. У світі посилюються вимоги до екологічних стандартів і впровадження циркулярної економіки, що включає переробку та повторне використання ресурсів, зокрема води. Згідно з даними Асоціації гірничих компаній (Mining Association), вартість очищення стічних вод у гірничо-металургійній промисловості становить близько 100 мільярдів доларів США на рік, зокрема на інвестиції в нові технології очищення та модернізацію існуючих систем [25]. Тому питання впровадження сучасних технологій очищення стічних вод на підприємствах ГМК є надзвичайно важливим для підвищення екологічної безпеки та стійкості цієї галузі.

Для досягнення мети дослідження використано такі методи: систематизація розрізнених знань про технології очищення стічних вод; збір інформації про стан питання, порівняння інформації з різних джерел; огляд нових знань із зазначенням тенденцій в розвитку цих знань; виділення нових напрямків досліджень в питаннях впровадження технологій; огляд перспективних ідей.

Виклад основного матеріалу. Стічні води – це води, що втратили свої природні властивості через використання в промислових, сільськогосподарських або побутових процесах, а також внаслідок контактів із забруднюючими речовинами. Вони можуть містити різноманітні забруднювальні речовини, такі як органічні сполуки, важкі метали, мінеральні частинки, а також патогенні мікроорганізми. Основна характеристика стічних вод – їх потенційна небезпека для екосистем та здоров'я людини, що зумовлює необхідність їх обробки перед скиданням у водні об'єкти [2].

У науковій літературі існує кілька підходів до визначення стічних вод, які варіюються залежно від контексту та специфіки галузі. Основні з них:

1. Екологічний підхід: Згідно з цим підходом, стічні води визначаються як води, які містять забруднюючі речовини, здатні завдати шкоди екосистемам, і їх скидання має бути контрольованим з екологічної точки зору [4].

2. Технологічний підхід: Тут стічні води трактуються як відпрацьовані води, що утворюються внаслідок промислових процесів. Вони повинні підлягати очищенню для відновлення якості води перед скиданням у водні об'єкти або повторним використанням [7].

3. Соціально-економічний підхід: У цьому контексті стічні води розглядаються як ресурс, який можна обробляти та повторно використовувати, що важливо в умовах обмежених водних ресурсів. Дослідники акцентують увагу на важливості раціонального використання стічних вод, що веде до зменшення витрат на водопостачання та очищення [3].

Стічні води гірничо-металургійного комплексу (ГМК) мають складний хімічний склад, що зумовлено технологічними процесами, такими як збагачення руд, плавлення металів, гідрометалургійні операції, а також використанням води для охолодження та промивки [3]. Основні компоненти стічних вод ГМК наведені в таблиці 1. Склад стічних вод може варіювати залежно від типу руд, технологічних процесів та використовуваних хімічних реагентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Очищення стічних вод базується на їхньому хімічному складі, оскільки кожен тип забруднювача вимагає спеціалізованих технологій для ефективного видалення. Тому проаналізуємо основні методи очищення стічних вод з погляду на переваги, недоліки та ефективність видалення тих чи інших компонентів.

Механічні методи очищення є одними з найпростіших і найбільш широко використовуваних технологій для видалення нерозчинних домішок зі стічних

Таблиця 1

Хімічний склад стічних вод гірничо-металургійного комплексу за групами, компонентами, джерелами походження забруднювачів

Група забруднювачів	Компоненти	Джерело походження
Метали	Мідь, цинк, свинець, кадмій, нікель, залізо, марганець та інші важкі метали	Вилуговування з руди, знос обладнання, добавки в технологічних процесах
Кислоти та луги	Сульфатна кислота, соляна кислота, луги (наприклад, натрій гідроксид)	Процеси вилуговування металів, нейтралізація кислотних розчинів
Нафтопродукти	Масла, паливо, емульсії нафтопродуктів	Знос обладнання, витік мастил, промивка обладнання
Солі	Сульфати, хлориди, нітрати	Розчинення мінералів у воді, використання реагентів у технологічних процесах
Органічні речовини	Феноли, ціаніди, поверхнево-активні речовини, смоли	Процеси флотації, використання реагентів, розкладання органічних сполук
Суспендовані тверді речовини	Глина, пісок, шлам, металеві частинки	Знос обладнання, процеси подрібнення руди, відходи виробництва

Джерело: складене автором за даними [8, 10, 11]

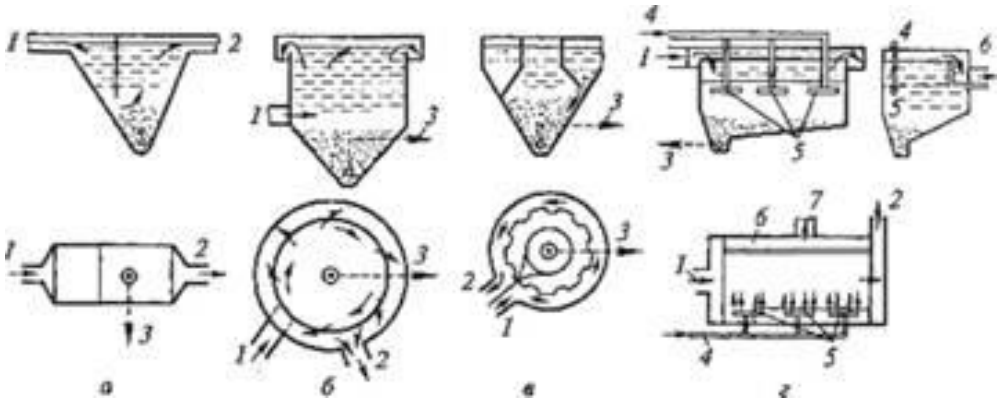

Рис. 1. Схеми пісколовок: а – вертикальна; б, в – горизонтальні з круговим рухом води; г – аеруючі; 1 – подаючий канал; 2 – відвідний канал; 3 – відведення піщаної пульпи; 4 – повітропровід; 5 – повітророзподільники; 6 – збірний канал спливаючих речовин; 7 – канал відводу спливаючих речовин

вод. Ці методи базуються на фізичних процесах і не потребують хімічних реагентів або біологічних реакцій. Механічні процеси ефективні для видалення великих часток та суспендованих твердих речовин.

Основні механічні методи:

1. Решітки та сита – затримують великі частки (пластик, каміння, рослинні залишки тощо).

2. Пісколовки – для видалення піску, грунту та інших мінеральних часток, які осідають під дією сили тяжіння.

3. Відстоювання – осадження суспендованих речовин у спеціальних відстійниках, що дозволяє їх зосередити на дні резервуарів.

4. Фільтрація – для відділення дрібних часток за допомогою фільтрувальних матеріалів.

5. Центрифугування – процес відокремлення твердих часток від рідини шляхом дії відцентрових сил.

Найбільш розповсюдженим є процес очищення води пісколовками, схемуи яких зображені на рисунку 1 [4].

Оскільки механічні методи очищення первинно призначені для видалення великих, нерозчинних частинок, їх ефективність щодо інших груп забруднювачів буде обмеженою або відсутньою (табл. 3).

Механічні методи очищення є важливим першим етапом, але вони не можуть повністю очистити стічні води від усіх забруднень. Наступними йдуть хімічні методи, які передбачають додавання різних реагентів для зміни хімічних властивостей забруднювачів та їх переведення в нерозчинну форму або безпечні сполуки. Ці методи широко застосовуються для видалення важких металів, нейтралізації кислот та лугів, окиснення органічних сполук та знищення патогенних мікроорганізмів.

Таблиця 2

Переваги та недоліки механічних методів очищення стічних вод ГМК

Переваги	Недоліки
Простота та відносно низька вартість впровадження та експлуатації	Обмежена ефективність для видалення дрібних або розчинених забруднювачів
Відсутність потреби у хімічних реагентах	Не можуть видалити органічні та токсичні хімічні речовини
Низьке енергоспоживання	Великі обсяги осаду, які потребують додаткової обробки або видалення
Висока надійність та стабільність роботи	Ефективність знижується при великій кількості дрібнодисперсних забруднювачів
Легкість у обслуговуванні	Вимагає регулярного очищення та утримання фільтрів, решіток тощо

Джерело: складене автором за даними [12, 14]

Таблиця 3

Ефективність очищення стічних вод ГМК механічними методами

Група забруднювачів	Ефективність очищення	Причина
Метали	Низька	Механічні методи видаляють лише металеві частинки, що є суспендованими у воді. Розчинені іони металів залишаються у воді.
Кислоти та луги	Низька	Механічні методи не впливають на кислотність або лужність води.
Нафтопродукти	Середня (для великих крапель)	Великі краплі нафтопродуктів можуть бути затримані в відстійниках, але дрібні емульсії залишаться у воді.
Солі	Низька	Солі є розчиненими речовинами і не затримуються механічними методами.
Органічні речовини	Середня (для великих молекул)	Великі органічні молекули, такі як волокна або шматки рослин, можуть бути затримані, але розчинені органічні речовини залишаться у воді.
Суспендовані тверді речовини	Висока	Механічні методи дуже ефективні для видалення піску, глини та інших нерозчинних частинок.

Джерело: складене автором за даними [15, 24]

Основні хімічні методи:

- Коагуляція та флокуляція-найбільш поширені: введення коагулянтів (наприклад, солей заліза або алюмінію) призводить до утворення пластівців, які захоплюють дрібні частинки забруднювачів і випадають в осад (рис. 2).

Нейтралізація: додавання кислот або лугів для нейтралізації кислого або лужного середовища стічних вод.

- Окиснення: застосування окисників (хлор, озон, перекис водню) для руйнування органічних сполук, знищення патогенних мікроорганізмів та окиснення неорганічних речовин.
- Відновлення: використання відновників (наприклад, сірководню) для переведення деяких сполук у менш токсичні форми.
- Осадження: додавання реагентів, які утворюють нерозчинні сполуки з забруднювачами, які потім видаляються шляхом фільтрування або відстоювання.
- Екстракція: перехід забруднювачів з водної фази в органічну, що дозволяє їх концентрувати та видаляти.

Загалом, хімічні методи дозволяють досягти високого ступеня очищення від широкого спектру забруднювачів, включаючи важкі метали, кислоти, луги, нафтопродукти та органічні сполуки (табл. 5). Коагуляція, флокуляція та осадження ефективно видаляють з води зважені речовини та колоїди, а окиснення та відновлення дозволяють перетворити шкідливі речовини на менш токсичні або нерозчинні сполуки.

Однак, слід зазначити, що хімічні методи не завжди є універсальними і можуть бути неефективними для видалення деяких стійких органічних забруднювачів. Окрім того, надмірне дозування реагентів може призвести до утворення нових, більш токсичних сполук або забруднення осаду.

Загалом, хімічні методи очищення є потужним інструментом для досягнення високого ступеня очи-

Рис. 2. Схема технологічного процесу очищення стічної води коагулянтами [4]

Таблиця 4

Переваги та недоліки хімічних методів очищення стічних вод ГМК

Переваги	Недоліки
Висока ефективність видалення широкого спектру забруднювачів	Висока вартість реагентів
Можливість досягнення високого ступеня очищення	Утворення великої кількості осаду, який потребує утилізації
Гнучкість методу (можливість підбору реагентів під конкретні забруднення)	Можливість утворення нових, більш токсичних сполук
Можливість автоматизації процесу	Високі енерговитрати для деяких процесів

Джерело: складене автором за даними [15, 23, 24]

Таблиця 5

Ефективність хімічних методів очищення стічних вод ГМК

Група забруднювачів	Ефективність очищення	Причина
Метали	Висока	Коагуляція, осадження, екстракція ефективно видаляють метали з води.
Кислоти та луги	Висока	Нейтралізація дозволяє довести pH води до нейтральних значень.
Нафтопродукти	Висока	Окиснення та коагуляція ефективні для видалення нафтопродуктів.
Солі	Середня	Деякі солі можуть бути видалені осадженням, але розчинність інших солей обмежує ефективність методу.
Органічні речовини	Висока	Окиснення та коагуляція ефективні для видалення багатьох органічних сполук.
Суспендовані тверді речовини	Висока	Коагуляція та флокуляція ефективно видаляють дрібні зважені частинки.

Джерело: складене автором за даними [15, 23]

щення стічних вод від різних забруднювачів. Однак, їх застосування пов'язане з певними обмеженнями, такими як висока вартість, утворення великої кількості осаду та можливість утворення нових токсичних сполук. Серед світових гірничо-металургійних компаній хімічні методи застосовують:

1) BHP – одна з найбільших гірничих компаній у світі, що функціонує в Австралії, Південній

Америці, Північній Америці та Африці. Компанія займається видобутком різних корисних копалин, включаючи залізну руду, мідь, вугілля та інші мінерали. Для очищення стічних вод BHP використовує комбінацію хімічних методів, таких як коагуляція, флотація та нейтралізація. Коагуляція дозволяє об'єднувати дрібні частки забруднень в більші агломерати, які легше видалити, тоді як флотація використовує повітря для видалення цих часток з води. Нейтралізація кислотних стічних вод допомагає відновити pH до безпечних рівнів [11].

2) Rio Tinto – міжнародна компанія, що працює в Австралії, Канаді, Південній Америці та Африці, займається видобутком мінералів, зокрема алюмінію, міді, залізної руди та бокситів. Компанія використовує хімічні методи очищення стічних вод, такі як осадження та коагуляція. Осадження дозволяє видаляти важкі метали та інші забруднення шляхом використання осаджувачів, які допомагають відокремити частки з води [29].

3) Anglo American – глобальна компанія з видобутку корисних копалин, що працює в Південній Африці, Південній Америці та Австралії. Вона займається видобутком платини, алюмінію, мідної руди та інших металів. Для очищення стічних вод компанія застосовує коагуляцію та флотацію. У процесі коагуляції до стічних вод додаються хімічні реагенти, які сприяють утворенню більших часток, що легше видаляються. Флотація, в свою чергу, включає впровадження повітря у воду, що дозволяє важким часткам спливати на поверхню для подальшого видалення [9].

Загалом, хімічні методи очищення стічних вод, які застосовують ці компанії, демонструють високу ефективність у зменшенні концентрації забруднювачів. Відповідно до звіту World Bank (2018**)** про управління водними ресурсами в гірничо-металургійній промисловості, хімічні технології очищення дозволяють знизити рівень забруднень на 80-95%, забезпечуючи при цьому відповідність екологічним стандартам [34].

Фізико-хімічні – це сукупність процесів, що поєднують фізичні та хімічні явища для видалення забруднень з води. Вони ефективні для широкого спектру домішок, включаючи метали, кислоти, луги, нафтопродукти, органічні речовини та суспендовані тверді частинки.

Основні фізико-хімічні методи:

- Коагуляція і флокуляція: цей процес передбачає злипання дрібних частинок у більші агрегати під впливом коагулянтів (солі заліза, алюмінію) та флокулянтів (високомолекулярні сполуки). Ці агрегати потім легко видаляються шляхом відстоювання або фільтрування.
- Флотація: заснований на принципі прилипання дрібних частинок до бульбашок повітря і їх винесення на поверхню, звідки їх легко видаляють.
- Сорбція: процес поглинання забруднювачів поверхнею твердих сорбентів (активоване вугілля, цеоліти). Забруднювачі фізично або хімічно зв'язуються з поверхнею сорбенту, що дозволяє їх ефективно видаляти з води.
- Іонний обмін: заснований на обміні іонів забруднювачів на інші іони, що містяться в іонообмінних смолах. Цей метод ефективний для видалення іонів металів, кислот, лугів.
- Мембранні процеси: передбачають пропускання води через мембрани з дрібними порами, які затримують забруднювачі. Існують різні види мембранних процесів: мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос.
- Окиснення: процес руйнування органічних сполук за допомогою окисників (озон, перекис водню, хлор). Цей метод використовується для дезінфекції та видалення органічних забруднень.
- Нейтралізація: взаємодія кислот і лугів з відповідними реагентами для утворення нейтральних солей. Використовується для нейтралізації кислотних і лужних стічних вод.
- Осадження: переведення розчинних речовин у нерозчинну форму. Застосовується для видалення важких металів, фосфатів та інших сполук.

Фізико-хімічні методи очищення стічних вод є важливими для забезпечення якості води та зменшення впливу забруднень на навколишнє середовище. Вони демонструють високу ефективність у видаленні різних груп забруднювачів, проте для досягнення найкращих результатів їх слід використовувати в комбінації з іншими методами.

Приклади компаній, зокрема Vale S.A. і Southern Copper Corporation, підтверджують важливість фізико-хімічних методів очищення стічних вод

Таблиця 6

Переваги та недоліки фізико-хімічних методів очищення стічних вод ГМК

Переваги	Недоліки
Висока ефективність у видаленні багатьох забруднень	Можливість утворення вторинних забруднень
Широкий спектр застосування	Високі експлуатаційні витрати
Простота технології	Необхідність у постійному контролі
Можливість швидкого очищення	Обмежена ефективність щодо деяких органічних забруднень

Джерело: складене автором за даними [11, 15]

у гірничо-металургійній промисловості. Vale, один з найбільших світових виробників залізної руди та нікелю, впроваджує мембранні технології, зокрема мікрофільтрацію та зворотний осмос, досягаючи видалення до 99% розчинних солей і важких металів, зокрема заліза, з концентрації 100 мг/л до 1 мг/л [38]. Southern Copper, один з провідних виробників міді у світі, застосовує сорбцію та іонний обмін для очищення своїх стічних вод [39]. Сорбційні системи цієї компанії можуть знижувати вміст важких металів, таких як мідь, з 15 мг/л до 0.1 мг/л, а іонний обмін дозволяє знижувати концентрацію свинцю з 50 мг/л до 0.02 мг/л.

Термічні методи очищення стічних вод у гірничо-металургійному комплексі полягають у використанні високих температур для руйнування або видалення забруднювачів. Основними термічними методами є:

1. Концентрована дистиляція: цей процес передбачає нагрівання води до кипіння, в результаті чого пара відокремлюється від рідких забруднень. Пара конденсується, утворюючи очищену воду, а забруднюючі речовини залишаються в рідкому залишку.

2. Піроліз: процес термічного розкладання органічних речовин у відсутності кисню. Висока температура (близько 300-800°C) призводить до розкладання органічних забруднювачів на простіші молекули, гази та рідину.

3. Плазмова обробка: використання плазми для руйнування забруднювачів. Висока температура плазми (більше 5000°C) забезпечує ефективне знищення органічних сполук і важких металів.

4. Спалювання: це метод, за якого забруднювачі спалюються при високих температурах, що призводить до їх перетворення в гази (вуглекислий газ, водяна пара) та залишків (золи).

Термічні методи очищення стічних вод гірничо-металургійного комплексу мають як свої переваги, так і недоліки, які важливо враховувати при виборі технології для конкретних типів забруднень. Вони ефективні для видалення органічних речовин і деяких металів, але можуть бути менш корисними для інших забруднювачів, таких як солі або суспендовані тверді частки (табл. 9).

Термічні методи очищення стічних вод є важливими у гірничо-металургійній промисловості, оскільки вони забезпечують ефективне видалення органічних забруднювачів і можуть справлятися з великими обсягами води. Проте їх висока енергетична витратність і обмежена ефективність щодо неорганічних забруднювачів залишають простір для вдосконалення та комбінування з іншими методами очищення.

Glencore – одна з найбільших транснаціональних гірничо-металургійних компаній, яка постійно вдосконалює свої процеси очищення стічних вод, використовуючи термічні методи для зниження обсягів забруднень і забезпечення безпечного виведення органічних речовин, що підкреслює їхню важливість у стратегії компанії щодо екологічної відповідальності та сталого розвитку [42].

Таблиця 7

Ефективність фізико-хімічних методів очищення стічних вод ГМК

Група забруднювача	Ефективність (%)	Причина
Метали	Висока	Коагуляція та осадження ефективно видаляють важкі метали.
Кислоти та луги	Висока	Нейтралізація коригує pH до безпечного рівня.
Нафтопродукти	Висока	Флотація та сорбція ефективно видаляють нафтопродукти.
Солі	Середня	Іонний обмін та осадження можуть бути менш ефективними.
Органічні речовини	Висока	Сорбція та окиснення видаляють органічні забруднення.
Суспендовані тверді речовини	Висока	Флотація та осадження дозволяють видаляти суспендовані частки.

Джерело: складене автором за даними [11, 15]

Таблиця 8

Переваги та недоліки термічних методів очищення стічних вод ГМК

Переваги	Недоліки
Висока ефективність видалення органічних сполук	Високі витрати на енергію та експлуатацію
Можливість обробки великих обсягів стічних вод	Необхідність спеціального обладнання
Зменшення обсягу відходів	Викиди забруднюючих газів при згоранні
Швидкість процесу	Обмежена ефективність для неорганічних забруднювачів

Джерело: складене автором за даними [21, 37]

Таблиця 9

Ефективність термічних методів очищення стічних вод ГМК

Група забруднювача	Ефективність	Причина
Метали	Середня	Можуть бути знищені при високих температурах, але деякі можуть залишатись.
Кислоти та луги	Висока	Термічне розкладання кислотовмісних сполук призводить до їх нейтралізації.
Нафтопродукти	Висока	Спалювання нафтопродуктів при високій температурі забезпечує їх повне знищення.
Солі	Низька	Більшість солей не підлягають термічному розкладанню.
Органічні речовини	Висока	Термічне розкладання руйнує органічні сполуки, знижуючи їх концентрацію.
Суспендовані тверді речовини	Низька	Висока температура може призвести до зменшення, але не видалення твердих часток.

Джерело: складене автором за даними [21, 37]

Компанія реалізує різні технології, такі як випаровування та термічний окис, для ефективного видалення органічних сполук і зменшення обсягів забруднених вод. Випаровування дозволяє досягти 90-95% зменшення обсягу стічних вод і концентрації органічних речовин, тоді як термічний окис може забезпечити очищення до 98% для токсичних органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти.

Останньою групою методів очищення стічних вод у гірничо-металургійному комплексі є біологічні методи, які ґрунтуються на використанні живих організмів, таких як бактерії, водорості та гриби, для розкладання органічних забруднювачів. Ці методи включають кілька основних підходів:

1. Аеробна обробка: цей метод передбачає використання аеробних бактерій, які розкладають органічні сполуки в присутності кисню. Процес може відбуватися у відкритих ставках або в біореакторах, де підтримується аерація.

2. Аноксидна обробка: у цьому методі використовуються анаеробні бактерії, які не потребують кисню для метаболізму. Цей процес ефективно видаляє органічні речовини і виробляє метан, який може бути використаний як енергія.

3. Біофільтри: у цьому методі стічні води пропускаються через матеріали, на яких ростуть бактерії. Біофільтри забезпечують ефективне очищення завдяки контактному розкладанню забруднювачів.

4. Біополігони: це природні системи, де стічні води очищуються за допомогою водоростей і інших рослин, що поглинають забруднювачі та виділяють кисень.

Одним з найбільш досконалих методів біологічної очистки стічних вод є Мембранний біореактор (МБР) [36]. В очисних комплексах із застосуванням мембранних біореакторів відбуваються ті ж біохімічні процеси, що і в класичних очисних спорудах. Різниця між очисними з МБР і класичної схеми полягає в тому, що вузол відділення активного мулу у вторинних відстійниках замінюється на фільтрацію через полімерні мембранні елементи, що гарантує відсутність механічних домішок в очищеній воді і не потребує додаткового доочищення (рис. 3).

Переваги такої технології :

– мінімально можливі площі очисних споруд зі збереженням якості очищеної води на виході (наприклад, очисні споруди продуктивністю 200 м^3/добу з МБР займають площу 30 м^2, в той же час очисні за класичною схемою не менше 120 м^2);

– повна відсутність неприємних запахів в процесі очищення (дає можливість реалізовувати установки очищення в безпосередній близькості з житловими приміщеннями, однак нормативними базами України подібні рішення заборонені);

– збільшення продуктивності існуючих очисних споруд без збільшення займаної площі (реконструкція очисних споруд за рахунок збільшення в аеротенках концентрації активного мулу і застосування мембранних модулів) [36].

В цілому біологічні методи відзначаються екологічною безпечністю, високою ефективністю у видаленні органічних забруднень і можливістю повторного використання ресурсів, але водночас вони потребують тривалого часу для обробки, є чутливими до змін умов середовища та вимагають постійного контролю й обслуговування для ефективної роботи (табл. 10).

Біологічні методи мають велику ефективність у видаленні органічних забруднювачів і добре підходять для довготривалих систем очищення з мінімальним втручанням людини. Водночас вони не завжди здатні ефективно справлятися з неорганічними речовинами, такими як метали або солі. Для кращого розуміння того, як біологічні методи працюють з різними типами забруднювачів, нижче наведено таблицю з оцінкою їх ефективності та причинами.

Таблиця демонструє, що біологічні методи найбільш ефективні для видалення органічних речовин, оскільки бактерії та водорості активно їх розкладають. Натомість метали, солі та кислоти майже

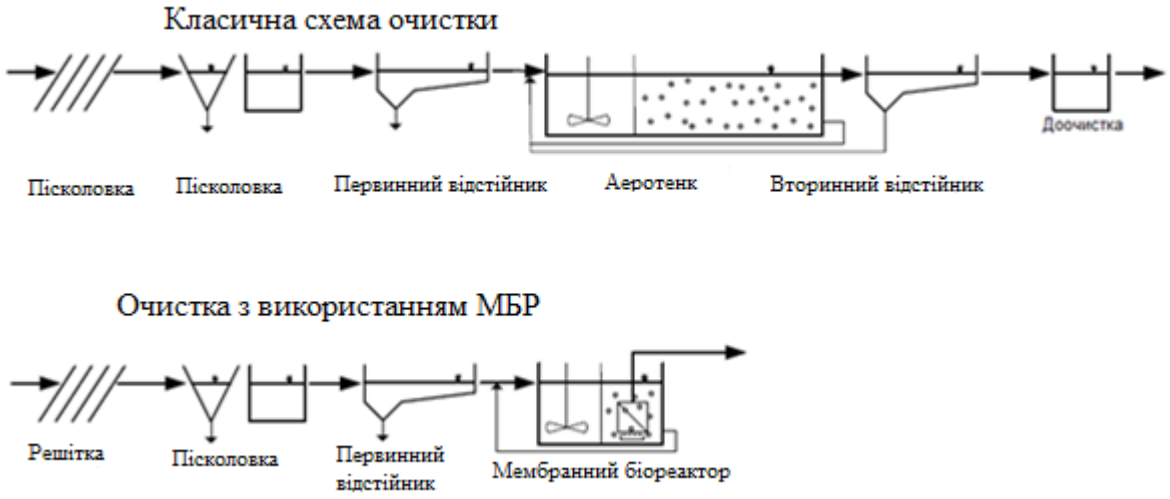

Рис. 2. Порівняння класичної схеми очистки та з застосуванням МБР

Таблиця 10

Переваги та недоліки біологічних методів очищення стічних вод ГМК

Переваги	Недоліки
Екологічно чисті, без використання хімікатів	Довгий час очищення
Висока ефективність видалення органічних забруднювачів	Чутливість до змін умов (температура, pH)
Можливість повторного використання ресурсів	Не завжди ефективні для неорганічних забруднювачів
Виробництво енергії (метан) у анаеробних процесах	Необхідність регулярного контролю та обслуговування

Джерело: складене автором за даними [17, 36]

Таблиця 11

Ефективність біологічних методів очищення стічних вод ГМК

Група забруднювача	Ефективність	Причина
Метали	Низька	Біологічні методи не ефективні для видалення важких металів.
Кислоти та луги	Середня	Анаеробні процеси можуть нейтралізувати деякі кислоти, але не всі.
Нафтопродукти	Середня	Деякі мікроорганізми можуть розкладати нафтопродукти, але не завжди ефективно.
Солі	Низька	Біологічні методи не підходять для видалення солей.
Органічні речовини	Висока	Біологічні організми ефективно розкладають органічні сполуки.
Суспендовані тверді речовини	Середня	Можливе часткове видалення через осадження, але не завжди повне.

Джерело: складене автором за даними [17, 36]

не піддаються біологічному очищенню, оскільки ці речовини не розкладаються живими організмами. Нафтопродукти можуть частково розкладатися, але процес є повільним. Для суспендованих твердих речовин ефективність середня – вони можуть осідати, але повне їх видалення потребує інших методів.

Однією з компаній, що активно впроваджує біологічні методи є Newmont Corporation –провідний виробник золота у світі, що активно впроваджує біологічні методи очищення стічних вод. Компанія використовує як анаеробні, так і аеробні процеси для ефективного видалення органічних забруднювачів та важких металів зі стічних вод. Завдяки цим методам, Newmont досягає високої ефективності очищення, яка може сягати до 90%. Це не лише знижує негативний вплив на навколишнє середовище, але й сприяє підвищенню якості води, що скидається, що важливо для дотримання екологічних стандартів і регуляцій [26].

Висновки. Стічні води є важливим екологічним питанням, оскільки вони містять забруднюючі речовини, які можуть завдати шкоди екосистемам. Визначення стічних вод варіюється залежно від контексту, зокрема, з екологічної, технологічної та соціально-економічної точок зору.

Особливу увагу варто приділити очищенню стічних вод, що утворюються в гірничо-металургійній промисловості. Ці води часто містять високі концентрації токсичних речовин, таких як важкі метали, а також залишки хімічних реагентів, що використовуються в процесах видобутку та збагачення руд 4. За даними Міжнародної ради з металургії, значна частина стічних вод скидається без належної обробки, що призводить до серйозного забруднення водних ресурсів.

У науковій літературі вже існує низка досліджень, присвячених технологіям очищення стічних вод. Різні методи, такі як коагуляція, фільтрація, мембранні системи та біологічне очищення, демонструють різний ступінь ефективності у видаленні забруднень. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, що потребує комплексного підходу до вибору технології очищення.

Механічні методи ефективні для видалення великих, нерозчинних частинок, але мають обмежену ефективність щодо розчинених забруднювачів, таких як метали, кислоти та органічні речовини. Хімічні методи демонструють високу ефективність у видаленні широкого спектра забруднень, включаючи метали, кислоти, нафтопродукти та органічні речовини. Вони можуть знижувати рівень забруднень на 80-95%, але потребують використання реагентів і обробки утвореного осаду. Фізико-хімічні методи ефективні для багатьох груп забруднювачів, але можуть утворювати вторинні забруднення і потребують постійного контролю.

У термічних методах використовуються високі температури для руйнування або видалення забруднювачів. Вони ефективні для органічних забруднень, але мають високі енергетичні витрати. Біологічні методи очищення стічних вод, які використовують живі організми для розкладання органічних забруднень, є ефективними для органічних сполук, але менш придатні для неорганічних забруднювачів, потребують стабільних умов і зазвичай мають нижчі експлуатаційні витрати.

Перспективи використання результатів дослідження. Узагальнюючи, кожен з методів очищення стічних вод має свої переваги та недоліки, і їх ефективність може варіюватися в залежності від типу забруднень та специфіки процесу. З метою досягнення найкращих результатів часто рекомендується комбінувати різні методи очищення, щоб забезпечити комплексний підхід до вирішення проблеми забруднення вод.

Найчастіше найкращим рішенням є використання комбінованих систем, які поєднують кілька методів. Наприклад, механічне очищення може бути першим етапом, за яким слідують хімічні або фізико-хімічні методи для досягнення високої якості очищення. Перед вибором методу важливо провести аналіз стічних вод, щоб визначити типи і концентрації забруднень. Це дозволить підібрати найбільш ефективний метод очищення. Враховуйте не лише витрати на очищення, але й потенційний вплив на навколишнє середовище. Вибір методу повинен забезпечувати відповідність екологічним стандартам.

Література

1. Аніщенко О. В. Екологічна безпека металургійного комплексу України. Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Екологія. 2019. № 28(4). С. 47–53.
2. Білоконь, О. М. Сучасні методи очищення стічних вод промислових підприємств. Екологія та промисловість, 2018, 12(3), 23-30.
3. Горлач, С. П. Аналіз екологічної небезпеки стічних вод у металургійній промисловості. Екологічний вісник, 2020, 11(1), 17-22.
4. Зайцев, В. В. Очищення стічних вод промислових підприємств: сучасні методи та технології. Технології та інновації, 2019, 6(4), 29-35.
5. Міністерство екології та природних ресурсів України. Звіт про стан водних ресурсів України за 2020 рік. Офіційний вебсайт. 2021. URL: https://menr.gov.ua.
6. Петров, І. В. Класифікація та очищення стічних вод гірничо-металургійного комплексу. Вода і навколишнє середовище, 2017, 9(2), 45-50.
7. Шевченко, А. Ю. Інноваційні підходи до очищення стічних вод гірничо-металургійних підприємств. Екоіндустрія, 2020, 8(2), 55-60.
8. Akhmetshin, E. M., & Sirotkin, D. A. Low-cost technologies for mining wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(16), 15958–15965. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1934-6
9. Anglo Americal Sustainable Mining Plan. URL: https://www.angloamerican.com/sustainable-mining-plan/healthy-environment/water
10. Ayoob, S., & Gupta, A.). Water Quality Assessment of Industrial Effluents: A Review. Environmental Reviews, 2020, 28(3), 265-280. DOI: 10.1139/er-2019-0041.
11. Bunn, J., et al. Water Use in Mining: A Global Perspective. Water Resources Management, 2018, 32(7), 2271-2290. DOI: 10.1007/s11269-018-1945-5.
12. BHP. URL: https://www.bhp.com/news/case-studies/2023/08/new-use-for-wastewater-in-the-desert

13. Chrysafides, J., et al. Risk Assessment of Industrial Wastewater Discharges: A Comprehensive Study. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(12), 1-15. DOI: 10.1007/s10661-021-09668-2.
14. Crini, G., & Lichtfouse, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2019 URL: https://doi.org/10.1007/s10311-019-00859-y
15. European Environment Agency (EEA). Water pollution and water policy in Europe. EEA Report. 2021. № 15. 115 p.
16. Friedler, E., et al. Industrial Wastewater Treatment: A Review. Journal of Water Process Engineering, 2019, 31, 100726. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100726.
17. Genesis Water Technologies. (n.d.). Pros and cons of wastewater treatment methods: Coagulation & disinfection. *Genesis Water Technologies*. URL: https://ru.genesiswatertech.com/blog-post/pros-and-cons-of-wastewater-treatment-methods-coagulation-disinfection/
18. Glencore. *Sustainability Report 2023*. URL: https://www.glencore.com/.rest/api/v1/documents/static/be5b0554-2c1d-415d-8072-be6a30d91d79/GLEN-2023-Sustainability-Report.pdf
19. Hussain, A., Kumari, R., Sachan, S. G., & Sachan, A. Chapter 8 – Biological wastewater treatment technology: Advancement and drawbacks. In: Sillanpää, M., & Chaudhary, N. (Eds.), *Advanced Water Treatment* 2021, (pp. 213-245). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822503-5.00002-3
20. International Council on Mining and Metals (ICMM). Water management in mining: A selection of case studies. ICMM Report. 2020. 150 p.
21. International Council on Mining and Metals. Water Stewardship in Mining. ICMM, 2021. URL: https://www.icmm.com/en-gb/society-and-the-economy/water-stewardship (дата звернення: 13.10.2024).
22. Kumar, S., et al. Heavy Metal Contamination in Wastewater: Sources, Effects, and Treatment. Chemical Engineering Journal, 2021, 403, 126176. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126176.
23. Lee, J. H., et al. Characterization of Treated Wastewater Quality for Reuse. Journal of Environmental Management, 2020, 259, 109799. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109799.
24. Mansoor, B., et al. Acidic Wastewater: Treatment and Reuse Options. Water Research, 2019, 162, 442-451. DOI: 10.1016/j.watres.2019.07.031.
25. Marković Z.M., Đorđević S.M., Marinković D.M. Advanced technologies for wastewater treatment: A review. Reviews in Chemical Engineering. 2021. Vol. 37, Issue 4. P. 1-25. DOI: 10.1515/revce-2021-0094.
26. Maupin, J. Comminution in wastewater treatment: Enhancing efficiency and process reliability. *Water & Wastewater*. 2013, URL: https://www.waterandwastewater.com/comminution-in-wastewater-treatment-enhancing-efficiency-and-process-reliability/
27. Mining Association of Canada. Water Management in the Mining Sector. Mining Association of Canada, 2019. URL: https://mining.ca/wp-content/uploads/2019/04/WaterManagement.pdf (дата звернення: 13.10.2024).
28. Newmont Corporation. Sustainability Report 2022. URL: https://www.newmont.com/sustainability/
29. Regulation (EU) No 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on pollution control. Official Journal of the European Union. 2019. L 170/21.
30. Rio Tinto. URL: https://www.riotinto.com/en/sustainability/environment/industrial-environment
31. Sani, N., et al. Cooling Water: Challenges and Opportunities in the Industrial Sector. Energy Reports, 2020, 6, 1037-1046. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.06.009.
32. Southern Copper Corporation. Environmental Sustainability.2021 URL: http://www.southernperu.com.
33. United Nations Environment Programme (UNEP). Global Water Report 2020: Overview of Industrial Water Use. UNEP Report. 2020. 105 p.
34. United Nations Environment Programme (UNEP). Mining and Water Pollution: Water management in the extractive industries. UNEP Report. 2019. 89 p.
35. United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook. UNEP, 2021. URL: https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6 (дата звернення: 13.10.2024).
36. Utech18 decisions. URL: https://utech418.com/ochistka-stochnyih-vod/
37. Vale S.A. Sustainability Report. 2022 URL: http://www.vale.com.
38. World Bank. Pollution from Mining and Metallurgical Wastes: Global Trends and Best Practices. World Bank Report. 2018. 200 p.
39. World Bank. The Economic Costs of Water Pollution. World Bank, 2020. URL: https://www.worldbank.org/en/topic/watersupply/brief/water-pollution (дата звернення: 13.10.2024).
40. Zhang, W., et al. Organic Pollutants in Wastewater: Sources and Treatment Options. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(24), 30361-30377. DOI: 10.1007/s11356-020-09586-7.
41. Zodi, S., Potier, O., Lapicque, F., & Leclerc, J. P. Thermal Treatment of Industrial Wastewater. *ResearchGate*. 2015 URL: https://www.researchgate.net/publication/282463926_Thermal_Treatment_of_Industrial_Wastewater