

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-7>

УДК 628.3:621.396

Д. С. Рябінін, аспірант

ORCID: 0009-0000-5234-9456

В. Б. Гулевський, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1434-9724

Ю. О. Постол, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0749-3771

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: yulia.postol@tsatu.edu.ua

ДО ПРОБЛЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ВІД ФЕРОМАГНІТНИХ ЧАСТОК

Анотація. У статті розглянуто актуальні проблеми очищення стічних вод від феромагнітних часток, що утворюються внаслідок промислової діяльності. Гальванічні, машинобудівні, хімічні та металургійні підприємства щоденно продукують значні об'єми токсичних стічних вод, що містять феромагнітні частки, зокрема сполуки заліза, нікелю, хрому та міді. Ці компоненти становлять серйозну загрозу для навколишнього середовища та здоров'я людини, оскільки здатні накопичуватися у водних екосистемах, спричиняючи токсичні, мутагенні та канцерогенні ефекти.

З огляду на високий рівень екологічного ризику, очищення стічних вод від феромагнітних забруднювачів потребує не лише високої технологічної ефективності, а й економічної доцільності. Вилучення таких часток є одним із пріоритетних завдань сучасної водоочисної інженерії, що вимагає упровадження інноваційних рішень, здатних забезпечити стабільну роботу систем очищення в умовах змінного складу стічних вод.

Ключові слова: стічні води, феромагнітні частки, електромагнітна очистка, технологія, магнітна сепарація.

Постановка проблеми. Металургійні підприємства, особливо ті, що займаються виробництвом феросплавів, генерують стічні води з високим умістом заліза, марганцю, нікелю, хрому та міді [1]. Проблема очищення промислових стічних вод, зокрема тих, що містять важкі метали та органічні забруднювачі, є актуальною в контексті сталого розвитку та охорони довкілля.

Існує широкий спектр методів очищення стічних вод, які класифікуються за фізичними, хімічними, біологічними та комбінованими ознаками. Вибір оптимального методу залежить від агрегатного стану забруднювачів, їхнього хімічного складу, концентрації, а також від технологічних особливостей виробництва. Ефективність застосування того чи іншого способу визначається не лише ступенем очищення, а й енергетичними витратами, вартістю реагентів, складністю утилізації вторинних продуктів та екологічною безпекою.

Класичні методи очищення [2], такі як хімічне осадження, коагуляція та флокуляція, мають обмежену ефективність за низьких концентрацій іонів металів або в присутності колоїдних форм [3]. За даними [4], важкі метали не піддаються біологічному розкладу, накопичуються в донних відкладеннях і здатні до біоаккумуляції у живих організмах, що становить загрозу для екосистем та здоров'я людини.

Залізо та його оксиди мають виражені магнітні властивості, що дає змогу застосовувати магнітну сепарацію як ефективний метод вилучення [5]. Для слабомагнітних металів, таких як нікель і мідь, перспективним є метод феритизації, який передбачає утворення малорозчинних феритів у присутності заліза за контрольованих умов *pH* та температури [6].

У цьому контексті перспективним напрямом є електромагнітна очистка стічних вод – інноваційна технологія, що базується на використанні електромагнітних імпульсів для активації хімічних процесів, зокрема окиснення, редукції та агломерації часток. Такий підхід дає



змогу значно підвищити ефективність видалення важких металів, зокрема $Cr(VI)$, Cu^{2+} , Zn^{2+} , за знижених енергетичних витрат. Електромагнітна імпульсна активація сприяє інтенсифікації процесів феритизації, що забезпечує утворення стабільних магнітних осадів, придатних до подальшого вилучення магнітними сепараторами.

Під час порівняння технологій водоочищення необхідно комплексно враховувати енерговитрати на всі основні та допоміжні процеси, включаючи підготовку реагентів, транспортування, осадження, фільтрацію та утилізацію (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння електромагнітної та біологічної очистки стічних вод

Критерій	Електромагнітна очистка	Біологічна очистка
Тип забруднень	Важкі метали (Cr^{6+} , Fe^{2+} , Zn^{2+})	Органічні речовини, аміак, нітриди, фосфати
Механізм дії	Феритизація під дією електромагнітних імпульсів	Мікроорганізми розкладають органіку
Енерговитрати	Помірні	Низькі
Чутливість до умов	Висока: pH , температура, концентрації	Висока: температура, токсичність, кисень
Ефективність за змінного складу стоків	Стабільна під час налаштування	Може знижуватися за токсичних або нестабільних стоків
Утилізація осадів	Стабільні ферити, легко утилізуються	Осад активного мулу, потребує обробки
Вартість впровадження	Вища (обладнання, налаштування)	Нижча (особливо для побутових стоків)
Сфера застосування	Промислові підприємства з металами	Комунальні та харчові підприємства

В Україні діє понад 1 тис гальванічних підприємств, які генерують понад 500 млн м³ стічних вод на рік. Упровадження електромагнітної очистки дає змогу підвищити рівень регенерації води та металів, який нині становить лише ~10%. Пілотний проєкт у Харкові – на підприємстві з виробництва електронних компонентів було встановлено установку електромагнітної феритизації. Результат: зниження концентрації Cr^{6+} з 50 мг/л до < 0,1 мг/л, повторне використання води в технологічному процесі, зменшення витрат на реагенти на 40%.

У країнах Західної Європи рівень повторного використання очищеної води та металів сягає 97–98% завдяки впровадженню вискоефективних очисних систем, зокрема з електромагнітною активацією. Німеччина, Швеція, Японія активно інтегрують подібні установки у виробництво електроніки, гальваніки та хімічної продукції, де потрібна точна очистка від важких металів.

Ця технологія – не просто спосіб очищення, а інструмент сталого розвитку, який дає підприємствам змогу бути більш екологічними, економічно ефективними та відповідальними.

Таким чином, електромагнітна очистка є перспективною альтернативою традиційним методам, що поєднує високу ефективність, енергоощадність та екологічну безпеку.

Аналіз останніх досліджень. Електромагнітну очистку стічних вод найчастіше застосовують у тих галузях, де утворюються великі об'єми токсичних промивних вод, особливо з високим вмістом хрому, міді, заліза та інших важких металів. Ось ключові галузі застосування:

- кольорова металургія: у процесах гальванізації, анодування, травлення металів утворюються електроліти з хромом, які потребують ефективною нейтралізації;
- машинобудування та приладобудування: використання гальванічних ванн для покриття деталей створює стічні води з високим вмістом металів;
- електронна та електротехнічна промисловість: виробництво плат, мікросхем, кабелів супроводжується застосуванням хімічних реагентів, що потрапляють у стоки;



– хімічна промисловість: синтез реагентів, барвників, каталізаторів часто включає сполуки важких металів, які необхідно вилучати зі стічних вод;

– гальванічні цехи: особливо актуально для підприємств, де відбувається хромування, нікелювання, міднення – процеси, що генерують концентровані токсичні стоки.

Ця технологія не лише очищує воду, а й дає змогу повторно використовувати її у виробництві, що робить її надзвичайно привабливою з погляду ресурсозбереження та економії.

В Україні питання очищення стічних вод регулюється ДСТУ ISO 15586:2005, який визначає методи визначення металів у воді за допомогою атомно-абсорбційної спектроскопії. Проте, як зазначають [7], нормативна база потребує оновлення з урахуванням новітніх технологій та екологічних викликів.

Електромагнітна очистка стічних вод має низку стратегічних переваг для підприємств, особливо тих, що працюють із токсичними металами. Ось чому вона набирає популярності:

Економічні переваги:

– зниження витрат на реагенти – електромагнітна активація зменшує потребу в дорогих хімічних речовинах;

– менше енерговитрат – порівняно з термічними методами споживає менше енергії;

– можливість повторного використання води – очищена вода може повертатися у виробничий цикл, що скорочує витрати на водопостачання.

Екологічні переваги:

– зменшення вторинного забруднення – відсутність залишкових реагентів у воді, менше шкідливих осадів;

– стабільність осадів – утворені ферити не розчиняються у воді, що полегшує їх утилізацію;

– зниження навантаження на очисні споруди – технологія дає змогу локально обробляти стоки перед скиданням або повторним використанням.

Технологічні переваги:

– компактність обладнання – установки займають менше місця, легко інтегруються у виробничі лінії;

– гнучкість налаштувань – можна адаптувати до різних типів забруднень (хром, кадмій, мідь тощо);

– автоматизація процесу – контроль параметрів (pH , температура, магнітне поле) дає змогу стабільно підтримувати якість очищення.

Хоча електромагнітна очистка стічних вод має багато переваг, як і будь-яка технологія, вона не позбавлена певних недоліків та обмежень, які варто враховувати перед упровадженням:

– складність налаштування параметрів: для ефективної роботи потрібно точно контролювати силу магнітного поля, pH , температуру, співвідношення реагентів, а це вимагає високої кваліфікації персоналу;

– обмежена універсальність: метод найкраще працює для вилучення іонів хрому, цинку, заліза. Для інших забруднювачів (органічні речовини, нафтопродукти) може бути малоефективним;

– необхідність попередньої підготовки води: високий уміст суспензій або органіки може знижувати ефективність феритизації, тому потрібна додаткова механічна або хімічна очистка;

– вартість обладнання: хоча енерговитрати нижчі, самі установки з імпульсною активацією можуть бути дорогими для малого бізнесу або старих підприємств;

– потреба в модернізації існуючих систем: для інтеграції електромагнітної очистки часто потрібно перебудовувати або доповнювати існуючі очисні споруди;

– утворення вторинних продуктів: за неправильного налаштування можуть утворюватися нестабільні осади або сполуки, які важко утилізувати;



– нестабільність за зміни складу стоків: якщо склад стічних вод змінюється (наприклад, у різні зміни виробництва), ефективність феритизації може падати.

Ці недоліки не є критичними, але вони вимагають грамотного проектування, технічного супроводу та попереднього аналізу доцільності.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про необхідність упровадження інноваційних, багатокомпонентних систем очищення, адаптованих до специфіки промислових підприємств, з акцентом на вилучення феромагнітних часток та важких металів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію параметрів електромагнітного впливу, масштабування технології та інтеграцію її в існуючі системи водоочищення промислових підприємств.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Ураховуючи тенденції та перспективи використання електромагнітної системи очистки стічних вод, існує потреба в удосконаленні інженерних систем під час проектування для підвищення рівня енергозбереження.

Основна частина. Упровадження електромагнітної системи очистки є економічно обґрунтованим для підприємств із високим навантаженням на водоочисні системи. Склад феромагнітних домішок у стічних водах залежить від типу промислового виробництва, але найчастіше включає такі компоненти, що представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Основні феромагнітні домішки у стічних водах

Домішка	Джерело	Форма у воді	ГДК (мг/л)	Екологічна дія
Залізо (<i>Fe</i>)	Металургія, машинобудування	Fe^{2+} , Fe^{3+} , оксиди	0,5–1,0	Осадження, зміна кольору води
Нікель (<i>Ni</i>)	Гальваніка, хімія	Ni^{2+} , комплекси	0,01–0,1	Токсичний для водної фауни
Хром (Cr^{3+})	Покриття, фарбування	Cr^{3+}	0,1	Накопичення в організмах
Хром (Cr^{6+})	Гальваніка, фарби	Cr^{6+}	0,05	Канцероген, висока токсичність
Мідь (<i>Cu</i>)	Електротехніка	Cu^{2+} , оксиди	0,01–0,1	Біоаккумуляція, токсичність

Частки забруднюючих речовин у стічних водах можуть перебувати у формі розчинених іонів, колоїдних систем або завислих твердих частинок. Залізо та його оксиди характеризуються вираженими магнітними властивостями, що відкриває можливість застосування методів магнітної сепарації для їх вилучення. Нікель і мідь хоча й мають слабкі магнітні характеристики, можуть бути ефективно видалені з водного середовища шляхом феритизації – процесу утворення малорозчинних феритів у присутності заліза.

В акредитованій лабораторії ТОВ «Центр ЛТД» [8] методом атомно-абсорбційної спектроскопії (AAS), відповідно до вимог ДСТУ ISO 15586:2005, проводився аналіз стічних вод, що взяті на виході з локальних очисних споруд, які надходять із гальванічного та плавильного цехів АТ «Запорізький завод феросплавів».

Рис. 1 ілюструє порівняння фактичних концентрацій забруднюючих речовин із нормативними обмеженнями. Найбільше перевищення зафіксовано по залізу (*Fe*) – 1,7 мг/дм³ при ГДК 1,0 мг/дм³ та марганцю (*Mn*) – 0,9 мг/дм³ при ГДК 0,5 мг/дм³. Особливо значне перевищення спостерігається по залізу та марганцю, що свідчить про наявність феромагнітних домішок і потребу в застосуванні магнітної сепарації та феритизації. Особливо небезпечним є перевищення по *Mn*, які мають високу токсичність і здатність до біоаккумуляції. Перевищення по хрому (Cr^{6+}), нікелю (*Ni*) та нафтопродуктах також є суттєвими, хоча менше вираженими.

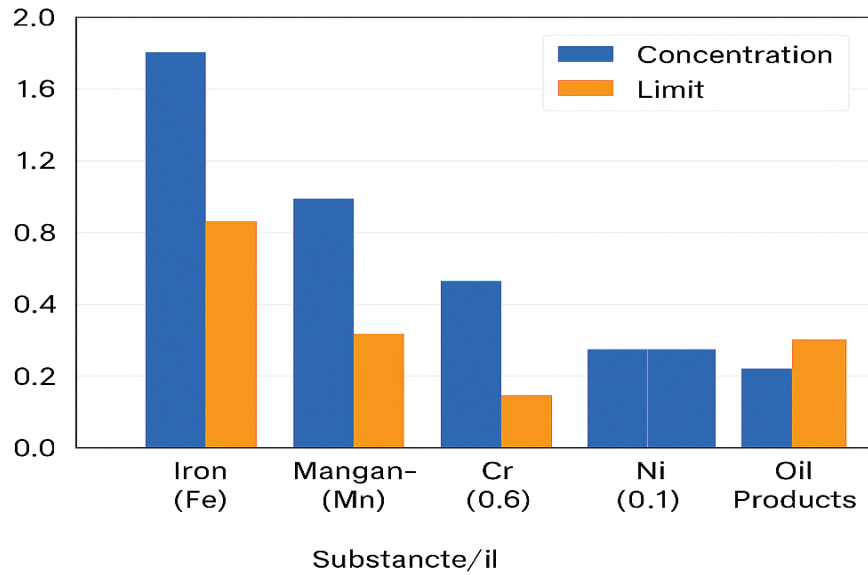


Рис. 1. Порівняння концентрацій забруднюючих речовин у стічних водах АТ «Запорізький завод феросплавів» із гранично допустимими нормами

Результати дослідження засвідчили перевищення гранично допустимих концентрацій за п'ятьма показниками, зокрема щодо вмісту важких металів та органічних забруднювачів, що свідчить про недостатню ефективність існуючої системи очищення (табл. 3).

Таблиця 3

Результати дослідження

Показник	Концентрація, мг/дм ³	ГДК, мг/д ³	Перевищення	Характер впливу
Залізо (<i>Fe</i>)	1,7	≤ 1,0	+70%	Осадження, зміна кольору
Марганець (<i>Mn</i>)	0,9	≤ 0,5	+80%	Біоаккумуляція, токсичність
Хром (<i>Cr⁶⁺</i>)	0,06	≤ 0,05	+20%	Канцерогенність
Нікель (<i>Ni</i>)	0,11	≤ 0,1	+10%	Токсичний для водної фауни
Мідь (<i>Cu</i>)	0,07	≤ 0,1	–	У межах норми
Нафтопродукти	0,35	≤ 0,3	+17%	Плівка на поверхні, пригнічення кисню
<i>pH</i>	7,4	6,5–8,5	–	Норма

Ураховуючи магнітні властивості заліза та марганцю, доцільним є впровадження магнітної сепарації та феритизації з електромагнітною активацією.

Проектування електромагнітної системи очистки стічних вод – це складний інженерний процес, який вимагає урахування багатьох технічних, хімічних та економічних чинників [9–11].

Основні етапи проектування:

1. Аналіз складу стічних вод:

- визначення концентрацій іонів важких металів (*Cr⁶⁺*, *Fe²⁺*, *Zn²⁺*);
- вимірювання *pH*, температури, наявності органіки та суспензій;
- оцінка добового обсягу стоків.

2. Вибір технологічної схеми:

- попередня механічна очистка (фільтрація, коагуляція);
- регулювання параметрів реакційної суміші (*pH* ~8–9, температура ~40 °C);
- основний блок з електромагнітною активацією;



- відділення осадів (магнітні фільтри, центрифуги);
- контроль якості очищеної води.

Проблеми функціонування електромагнітних систем очищення стічних вод.

1. Технічні обмеження:

– нестабільність параметрів магнітного поля. Установки часто не забезпечують стабільну індукцію магнітного поля (0,01–0,14 Тл), що критично впливає на ефективність очищення. Відсутність точного контролю частоти імпульсів та сили поля призводить до неповного осадження іонів металів;

– недостатня автоматизація процесу. Більшість промислових систем не має адаптивного керування, що ускладнює роботу за змінного складу стоків. Відсутність зворотного зв'язку між датчиками та контролерами знижує точність регулювання pH , температури та дозування реагентів;

– складність масштабування. Установки, ефективні в лабораторних умовах, часто втрачають продуктивність за переходу до промислових обсягів через нерівномірність поля та гідродинамічні втрати.

2. Хімічно-технологічні проблеми:

– обмежена селективність методу. Електромагнітна феритизація ефективна переважно для Cr^{6+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} . Для інших іонів, зокрема Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , ефективність значно нижча або потребує додаткових реагентів;

– вплив органічних домішок. Наявність ПАВ, нафтопродуктів або біологічних речовин у стоках може інгібувати процес феритизації, порушуючи утворення стабільних осадів;

– нестабільність осадів за порушення режиму. За відхилення від оптимального співвідношення Fe^{2+}/Cr^{6+} або pH можуть утворюватися нестійкі гідроксиди замість феритів, що ускладнює їх утилізацію.

3. Економічні та експлуатаційні виклики:

– висока вартість обладнання. Генератори імпульсного поля, системи керування, датчики – усе це потребує значних капіталовкладень, особливо для малих підприємств;

– потреба у кваліфікованому персоналі. Обслуговування системи вимагає знань у галузі електроніки, хімії, автоматизації. Недостатня підготовка операторів може призвести до порушення технологічного режиму;

– складність інтеграції в існуючі очисні споруди. Установки часто не узгоджуються з традиційними схемами очистки, що потребує реконструкції трубопроводів, резервуарів та систем управління.

4. Науково-методичні проблеми:

– відсутність стандартизованих методик розрахунку. Проектування установок базується переважно на емпіричних даних. Не існує загальноприйнятих нормативів щодо сили поля, частоти імпульсів, тривалості обробки;

– недостатня кількість прикладних досліджень. Більшість публікацій має теоретичний характер. Практичні кейси впровадження обмежені, що ускладнює оцінку довгострокової ефективності технології.

Ці виклики не є перешкодою, але вони вимагають ретельного проектування, пілотного тестування та технічного супроводу.

Перспективи вдосконалення технології.

1. Технологічна модернізація.

Упровадження адаптивних алгоритмів керування на базі мікроконтролерів або промислових ПЛК дасть змогу автоматично регулювати параметри процесу залежно від складу стічної води. Це забезпечить стабільність феритизації та зменшить вплив людського фактору.



Розроблення модульних систем із можливістю масштабування дасть змогу адаптувати технологію до різних обсягів виробництва – від лабораторних до промислових. Комбінування електромагнітної феритизації з біологічною або мембранною очисткою забезпечить комплексне видалення як неорганічних, так і органічних забруднень.

2. Хімічна оптимізація процесу.

Дослідження альтернативних джерел Fe^{2+} (наприклад, відходів металургії) може знизити витрати та підвищити екологічність процесу. Вивчення умов утворення багатокомпонентних феритів (наприклад, $Cr - Fe - Zn$) дасть змогу отримувати осади з покращеними фізико-хімічними властивостями, придатні для повторного використання.

3. Економічна та екологічна ефективність.

Включення витрат на виробництво, експлуатацію, утилізацію та екологічні вигоди дасть змогу обґрунтувати інвестиційну привабливість технології. Повторне використання води після феритизації знижує навантаження на водопостачання та каналізацію, що особливо актуально для підприємств із замкненим водним циклом.

4. Науково-методичне забезпечення.

Розроблення нормативних документів щодо сили магнітного поля, частоти імпульсів, тривалості обробки та якості осадів дасть змогу уніфікувати підходи до проектування та оцінки ефективності установок. Акумуляція досвіду впровадження електромагнітної феритизації на підприємствах різних галузей сприятиме поширенню технології та її адаптації до специфічних умов.

Висновки. Очищення стічних вод від феромагнітних часток – це складне завдання, яке має як технічні, так і екологічні виклики. Електромагнітна очистка є перспективним напрямом у сфері очищення стічних вод, проте її широке впровадження стримується низкою технічних, хімічних та методичних проблем. Системне вдосконалення установок через автоматизацію, хімічну оптимізацію, стандартизацію та інтеграцію з іншими методами дасть змогу перетворити технологію на ефективний інструмент сталого водокористування у промисловості.

Список використаних джерел

1. Kovalchuk O., Petrenko V., Hrytsenko M. Heavy metals in wastewater of ferroalloy production: Environmental risks and treatment technologies. *Environmental Safety and Natural Resources*, 1(29), 2019. 45–52.
2. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th ed.). McGraw-Hill Education. 2003.
3. Гулевський В.Б. Проблеми очищення стічних вод. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції пам'яті В.В. Овчарова «Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем», 20 травня – 04 червня 2020 р. Мелітополь : ТДАТУ, 2020.
4. Kurniawan T.A., Chan G.Y.S., Lo, W.H., Babel S. Physico-chemical treatment techniques for wastewater containing heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118(1–2), 2006. 83–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015>.
5. Zhou M., Liu Y., Wang D. Magnetic separation of iron oxides from industrial effluents. *Separation and Purification Technology*, 179, 1–8. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.015>.
6. Chen Y., Wang L. Ferritization treatment of nickel and copper in industrial wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015. 3(2), 1125–1132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.03.012>.
7. Shevchenko L., Bondarenko S., Melnyk R. Modernization of regulatory frameworks for wastewater treatment in Ukraine. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 2020. 21(5), 1–7. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/123456>.
8. Лабораторія. *Center LTD*. URL: <https://center-ltd.com.ua/laboratoriya/> (дата звернення: 01.09.2025).
9. Гулевський В.Б., Постолюк Ю.О. Перспективи вдосконалення очищення стічних вод та технічних рідин. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2022. № 2(26). С. 143–148. DOI: 10.31471/2415-3184-2022-2(26)-143-148.



10. Гулевский В.Б., Кузнецов И.А. Современные тенденции в автоматизации технологических процессов. *Науковий вісник ТДАТУ*. Вип. 9. Т. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-49.

11. Li J., Zhang Y., Zhao H. Advanced hybrid technologies for industrial wastewater treatment: A review. *Water Research*, 2021. 188, 116528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116528>.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2025

Стаття прийнята 29.09.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025



D. Riabinin, V. Hulevskiy, Y. Postol

Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

ON THE PROBLEM OF WASTEWATER TREATMENT FROM FERROMAGNETIC PARTICLES

Summary

The article addresses pressing issues related to the treatment of wastewater contaminated with ferromagnetic particles resulting from industrial activities. Electroplating, mechanical engineering, chemical, and metallurgical enterprises produce significant volumes of toxic wastewater daily, containing ferromagnetic particles—particularly compounds of iron, nickel, chromium, and copper. These components pose a serious threat to the environment and human health, as they can accumulate in aquatic ecosystems, causing toxic, mutagenic, and carcinogenic effects.

Given the high level of environmental risk, the purification of wastewater from ferromagnetic pollutants requires not only high technological efficiency but also economic feasibility. The removal of such particles is one of the priority tasks of modern water treatment engineering, demanding the implementation of innovative solutions capable of ensuring stable operation of purification systems under conditions of variable wastewater composition.

Keywords: wastewater, ferromagnetic particles, electromagnetic purification, technology, magnetic separation.