

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 504.06:628.472.3

DOI: 10.31649/2311-1429-2026-1-219-226

В. В. Файчук

Р. В. Петрук

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ІНФІЛЬТРАТУ СМІТТЕЗВАЛИЩ

Вінницький національний технічний університет

В роботі аналізуються можливості використання різноманітних шляхів очищення інфільтрату сміттєзвалищ, включаючи біологічні, фізико-хімічні, мембранні та гібридні методи. Наведені основні параметри та характеристики інфільтрату сміттєзвалищ. На основі аналізу літературних джерел вказано різні доступні для умов України методи очищення. Подано приклади реальних досліджень очищення інфільтрату та інших речовин. Наведено ефективність різних методів, їх переваги та недоліки. Також порівнюються кожен з цих методів за основними характеристиками: біологічне та хімічне споживання кисню, кількість амонійного азоту, вміст важких металів та ін. Також, розглянуто вплив віку сміттєзвалища на ефективність методу очищення, що, в свою чергу, впливають на їх вибір. Встановлено основну класифікацію за віком сміттєзвалищ та проаналізовано їх вплив на формування інфільтрату. Детально розглянуто бактеріологічні характеристики сміттєзвалища та враховано такі параметри: наявність мікробів, патогенів, грибів та іншого роду мікроорганізмів. Встановлено вплив інфільтрату на навколишнє середовище та ризики, які можуть бути ним спричинені. Аналіз цих методів дозволив вибрати найоптимальніший для очищення, враховуючи локальні параметри та потреби. Також, встановлено, що найбільш доцільними методами очищення інфільтрату сміттєзвалищ є саме гібридні, які поєднують у собі переваги комбінування методів, є універсальними та підвищують ефективність процесів очищення відходів.

Ключові слова: технології захисту навколишнього середовища, очищення інфільтрату сміттєзвалищ, органічні сполуки, забруднення доквілля, біологічні методи, фізико-хімічні та гібридні методи очищення, управління відходами.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.03.2026
Прийнята до друку / Accepted 21.04.2026
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Файчук В.В., Петрук Р.В.

Вступ

На сьогодні в Україні діє близько 6000 сміттєзвалищ загальною площею 9 тис. га. Ці дані стосуються тільки офіційно зареєстрованих полігонів. Також існує велика кількість нелегальних сміттєзвалищ, кількість яких дуже важко встановити. Окрім цього з часом кількість відходів лиш збільшується, оскільки в Україні функціонує лиш один сміттєспалювальний завод. Відповідно, кількість полігонів збільшується, у тому числі, несанкціонованих сміттєзвалищ. Сміттєзвалища є основними елементами систем поводження відходами, які, в свою чергу, утворюють інфільтрат – рідину, що безпосередньо впливає на поверхневі водойми та ґрунтові води і забруднює їх. Відтак, пошук шляхів зниження екологічної шкоди від сміттєзвалищ та інфільтрату є вкрай актуальний.

При цьому, головними характеристиками інфільтрату сміттєзвалищ є те, що він має високу концентрацію органічних сполук, важких металів та амонійного азоту (до 5000 мг/л) [1]. Від віку сміттєзвалища залежить те, як часто і якою мірою коливаються його характеристики. Це підтверджує той факт, що чим молодший інфільтрат, тим вищий вміст легко окиснюваних органічних речовин, у той час як у старшого більша здатність протистояти біологічному та хімічному розкладу. Основна мета цієї статті є пошук найоптимальніших шляхів очищення інфільтрату сміттєзвалища з фокусом на їх простоту і доступність у реалізації. Задачами роботи є: визначення основних характеристик сміттєзвалищ, дослідження основних методів очищення інфільтрату, а також на основі отриманої інформації формулювання висновків про доцільність використання того чи іншого методу, в залежності від конкретних умов та пошук найоптимальнішого методу для Умов України.

Характеристики інфільтрату сміттєзвалища

Інфільтрат сміттєзвалищ може містити в собі різні речовини, у тому числі: важкі метали, органічні та неорганічні сполуки, різні мікроорганізми та поживні елементи, тощо. Також інфільтрат сміттєзвалищ поділяють за його віком (молоді – до 5 років та старі понад 10 років), і, в залежності від віку варіюються його характеристики. З точки зору фізико-хімічних параметрів відбувається розподілення по двом основним фазам – ацидогенна та метаногенна фази. Ацидогенна фаза відповідає молодим сміттєзвалищам, тобто, як стадія гідролізу та ферментації, більш кислотна. А метаногенна відповідає старим сміттєзвалищам, коли середовище стабілізується та зростає його лужність [2]. У таблиці 1 розглянуто основні параметри інфільтрату сміттєзвалищ та порівняння в розрізі старих і молодих сміттєзвалищ [3, 25-27].

Таблиця 1

Порівняння параметрів інфільтрату старих і молодих сміттєзвалищ

Параметр	Одиниця виміру	Діапазон молодих сміттєзвалищ (ацидогенна фаза)	Діапазон старих сміттєзвалищ (метаногенна фаза)	Примітки
pH	0-14	3.7-6.6 (кислий)	7.0-8.5 (нейтральний або лужний)	У молодих змінюється значення pH через наявність карбоксильних кислот, а у старих, через буферну систему аміаку.
БСК	мг/л	4000-40 000	20-550	Високе БСК в молодих через органічні речовини. Знижується з часом.
ХСК	мг/л	6000-60 000	500-4500	Високе ХСК через наявність органічних та неорганічних забруднювачів.
Амонійний азот	мг/л	10-4500	84-4500	Високі концентрації через розклад білків. Амоній азот токсичний для водних екосистем.
Загальний азот	мг/л	16.6-45 000	-	Включає органічні та неорганічні сполуки з вмістом азоту.
Загальний фосфор	мг/л	0.1-30	-	Викликає евтрофікацію водойм.
Хлориди	мг/л	68-45 000	-	Високий вміст через солі у відходах.
Сульфати	мг/л	10-1750	~80	Концентрація різко знижується при переходів в до метаногенної фази.
Загальні розчинені тверді речовини	мг/л	300-50 000	-	Вказує на загальну мінералізацію.
Залізо (Fe)	мг/л	10.3-810	-	В кислому середовищі переходять у водну фазу, в лужному містяться у вигляді солей.
Цинк (Zn)	мг/л	0.055-155	-	
Хром (Cr)	мг/л	0.001-1.4	-	
Кадмій (Cd)	мг/л	0.0001-0.03	-	
Свинець (Pb)	мг/л	0.001-1.4	-	
Марганець (Mn)	мг/л	0.03-65	-	
Алюміній (Al)	мг/л	0.3-28	-	
Ртуть (Hg)	мг/л	0.001-0.05	-	
Розчинений органічний вуглець	мг/л	Високий (до 33%, молекулярна маса >1000 Дальтон)	-	Може спричиняти горіння.
Каламутність	NTU	406-443	-	Висока через суспензії.
Електропровідність	мкСм/см	2232-4250	-	Вказує на солоність.
Розчинений кисень	мг/л	1.47-2.06	-	Низький через анаеробні умови.

Звідси випливає що, інфільтрат може нести велику шкоду довкіллю, особливо на початкових стадіях через значне вимивання компонентів. При цьому спостерігається його токсичність та значний екологічний ризик. Цьому сприяють велика кількість органічних сполук, металів та інших речовин, що можуть забруднювати середовище. Часто кратність перевищення ГДК в інфільтраті може досягати близько 30 і вище [4].

Бактеріологічні характеристики. Розглядаючи інфільтрат сміттєзвалищ з точки зору

бактеріологічних характеристик, варто розуміти, що ця характеристика включає наявність різних мікробних груп, які сприяють розкладанню відходів та патогенних індикаторів. Мікробіом, в основному, складається з великої різноманітності бактерій, що можуть жити та розвиватись в умовах без кисню (анаеробні) та бактерій, які можуть виживати з киснем або без нього (факультативні). У той час як патогенні індикатори можуть становити великі ризики для здоров'я населення. У Таблиці 2 наведені основні домінуючі групи бактерій [5].

Таблиця 2

Домінуючі групи бактерій у інфільтраті сміттєзвалищ

Бактерія	Відсоток	Примітки
Proteobacteria	31-64%	До 94% за різними джерелами [24]
Bacteroidota	4.2-23.7%	-
Firmicutes	0.7-6.3%	-
Chloroflexus	3.4-19.8%	-

При цьому, можна виділити наступні ключові роди: *Candidatus Brocadia* (анамокс), *Thauera* (денітрифікація), *Nitrospira*, *Nitrosomonas*, *Nitrosospira* (окислення азоту), *Novosphingobium* (розклад ароматичних вуглеводнів).

Коли мова йде про патогенні індикатори, то варто відзначити їхню небезпеку. Вони можуть масово вражати населення, наприклад, через забруднення водойми. Серед основних типів патогенних індикаторів можна виділити загальні колі-форми – вміст може бути близько $\sim 1.2 - 2.6 \times 10^6$ КУО/мл, фекальні колі-форми – $\sim 6 \times 10^5$ КУО/мл, *E.coli* – $3 - 5.5 \times 10^5$ КУО/мл та інші патогени: *Salmonella*, *Enterococcus*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus*, *Clostridium* та інші у значно менших кількостях [6].

Також у інфільтраті присутні гриби, зокрема: *Aspergillus*, *Fusarium*, *Cladosporium* та інші. Загалом, може бути близько 10 видів грибів у інфільтраті, що здатні до мінералізації та біоремедіації [7].

Отже, як бачимо, інфільтрат значною мірою впливає на навколишнє середовище. У ньому присутні різні патогени: гриби, бактерії та інші сполуки і організми. Також побічним ефектом є те, що він сприяє зниженню мікроорганізмів у ґрунті. Вміст усіх вище згаданих речовин та його характеристики варіюються в залежності від локації, клімату та зовнішніх чинників. Тому при виборі методу очищення інфільтрату потрібно брати до уваги його характеристики у конкретних умовах.

Методи очищення інфільтрату сміттєзвалищ

На сьогодні існують різні методи очищення інфільтрату сміттєзвалищ. Вони поділяються на різні категорії за принципом та типом. Загалом, можна виділити три основних категорії методів очищення інфільтрату: біологічні, фізико-хімічні та мембранні типи. Якщо говорити про біологічні методи, то вони мають в основі використання різних організмів та мікроорганізмів, які, так чи інакше, впливають на органічні сполуки в залежності від умов. У той час, як фізико-хімічні методи використовують різні хімічні сполуки або фізичні властивості для відокремлення або нейтралізації забруднювачів. Мембранні методи, загалом, використовують принцип фільтрації на фільтрах з різними розмірами пор під тиском. Існують також ще комбіновані або гібридні методи, які можуть поєднувати кілька різних типів очищення для отримання кращого ефекту.

Біологічні методи очищення інфільтрату. Найбільш природними методами очищення являються біологічні. Вони бувають різні, але всі вони зводяться до одного – використання мікроорганізмів для трансформації або розкладання, а, отже, і ліквідації забруднювачів у інфільтраті.

В результаті біологічного очищення досягається зменшення хімічного та біологічного споживання кисню, токсичності та відбувається видалення важких металів і деяких органічних сполук. Варто зазначити, що ці методи екологічно чисті та досить низьковартісні. До основних їх типів належать: аеробні, анаеробні, біоплато (конструктивні водно-болотні угіддя) та комбіновані методи.

В основі аеробних методів [8] закладено використання кисню для окиснення органічних речовин аеробними бактеріями такими, як: *Heterotrophs*, *Nitrosomonas* та інші. Для прикладу можна навести метод активного мулу та біологічно аеровані фільтри. Цей метод дуже ефективно зарекомендував

себе у зниженні БСК до 90 - 98%. Він краще всього підходить для молодого інфільтрату.

Анаеробні методи [9] реалізуються із залученням анаеробних бактерій, таких як: *Metanogens* та *Acetogens*. Вони не потребують кисню для основних фаз розкладання речовин – гідроліз, ацетогенез та метаногенез. Цей метод вважається більш актуальним для старого інфільтрату. Основним продуктом розкладу є біогаз ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$). Найчастіше застосовуються такі технології, як анаеробні реактори та анаеробне співперетворення.

На практиці найчастіше, все ж таки, використовуються комбіновані методи, оскільки вони покривають більше можливостей, ніж один конкретний метод. Зокрема, розглянемо анаеробно–аеробні системи. У цьому випадку анаеробна стадія суттєво зменшує вміст органіки, у той час як аеробна повністю позбувається органічних речовин та нутрієнтів таких, як азот та фосфор. Як результат маємо зниження ХСК до 92% та амонійного азоту (NH_4^+) – 90%. Серед технологій, які використовують цей метод, можна виділити мембранні реактори, біологічне видалення нутрієнтів, системи часткової нітрифікації та інші. Їх використовують для старших сміттєзвалищ.

Доволі прогресивною технологією є біоплато, у яких для поглинання забруднювальних речовин використовують рослини типу: *Typha latifolia*, *Canna indica* та інші (фіторе mediaція) [28]. Характерною рисою цих рослин є здатність поглинати поживні речовини (основні забруднювачі інфільтрату), які необхідні для їхнього росту, а також діяльність мікроорганізмів типу *Aspergillus flavus*, *Chlorella* sp. для біоре mediaції.

Біологічні методи очищення теж ефективні, оскільки вони надзвичайно стійкі та мають можливість регенерації. Але, як і всі інші методи, мають свої умови, без дотримання яких їхня ефективність знижується, зокрема, температура, наявність важких металів та інші. Таким чином, аеробний метод демонструє свою ефективність за ХСК ~70-90%, БСК ~90-98%, NH_4^+ ~90-99%, загальний азот ~50-96%, важкі метали ~50-95% [8]. Ключовими перевагами є: висока ефективність видалення БСК та ХСК, гнучкість та низьке утворення шламу. Як недоліки, можна вважати аерацію, яка вимагає високого енергоспоживання, утворення осаду, чутливість до токсинів. Ефективність анаеробного методу для ХСК ~60-85%, БСК ~60-64%, NH_4^+ ~10-30%, важкі метали ~10-70% [9]. Він вирізняється порівняно низькими витратами та виділенням біогазу. При цьому, повільна деградація та чутливість до температури вважаються, як слабкі сторони цього методу. У той час, як комбінований метод характеризується комплексним видаленням ХСК та загального азоту. Його ефективність для ХСК ~92%, БСК ~90%, NH_4^+ ~90%, загальний азот ~80-98%, важкі метали ~60-85% [10]. Але складний контроль, значні інвестиції та складне управління роблять цей метод менш привабливим. Якщо мова йде про видалення металів, то метод фіторе mediaції може бути досить економічним та ефективним. Попри повільність, малі навантаження та експансивність ефективність цього методу може бути на рівні ~40-70% для ХСК, ~60-80% для БСК, NH_4^+ ~40-97%, загальний азот ~40-60% та важкі метали ~10-60% [11-12].

Важливо розуміти, що показники ефективності зниження важких металів для наведених методів залежать від конкретного металу, методу, віку інфільтрату, початкової концентрації, температури, наявності органіки, адсорбентів, сульфатів та інших показників.

Біологічні методи добре себе зарекомендували, як основа для очищення. Для досягнення результатів близьких до норм та стандартів, необхідна додаткова обробка. При виборі цих методів необхідно врахувати вік інфільтрату, відповідно, аеробні методи – для молодого та анаеробні для старого сміттєзвалищ.

Фізико–хімічні методи очищення інфільтрату. У випадках, коли інфільтрат має значну кількість важких металів, неорганічних солей, стійких органічних сполук та низьке біохімічне споживання, доцільним буде розглянути фізико–хімічні методи очищення інфільтрату. Ці методи полягають у використанні технологій, що базуються на фізичних процесах та хімічних реакціях. Тобто, для цих технологій розглядаються такі процеси як: фільтрація, осадження, адсорбція, окиснення, нейтралізація, коагуляція, флокуляція та ряд інших процесів, які ефективно можуть боротись із різними типами забруднювачів.

Наразі, відомо багато доступних фізико–хімічних методів очищення, серед яких можна підкреслити такі основні методи: коагуляція–флокуляція, адсорбція, мембранні технології, процеси окислення, електрохімічні процеси, іонний обмін та преципітація.

На сьогодні існує велика кількість методів, які можна використати для очищення інфільтрату, що використовують фізико–хімічні властивості та реакції. Існує велике різноманіття цих методів, як окремих, так і їх комбінації, для прикладу – метод коагуляції–флокуляції. Коагуляція–флокуляція це метод який передбачає додавання коагулянтів (хлорид заліза, сульфат алюмінію) та флокулянтів

(полімери). Відповідно, відбувається два протилежні процеси. Під час коагуляції відбувається об'єднання дуже маленьких частинок у значно більші (мікрофлокули) за допомогою застосування вищевказаних хімічних реагентів. У той час як флокуляція відповідає за злиття агрегованих частин у великі флокули під дією полімерів [13]. Звідси випливає влучне поєднання двох принципів в одному методі. Також є окремі методи, які використовують хімічні процеси, наприклад процес адсорбції. Це простий та, відносно, ефективний метод. Процес заснований на накопиченні забруднювачів на поверхні твердого матеріалу – сорбенті (активоване вугілля, біовугілля та інші) [14]. Існують і інші методи для очищення інфільтрату, такі як: електрохімічне очищення, іонний обмін та преципітація, стріпінг амонію, осадження, іонний обмін та хімічне окиснення. Усі ці методи мають свої характеристики, переваги та недоліки, сферу використання та особливості, що впливають на вибір методу очищення для конкретного випадку. Наприклад, коагуляція–флокуляція – простий та дешевий з ефективністю для ХСК ~46%, NH_4^+ ~ 23% та важкі метали ~35-68% [15]. Але його недоліком є утворення шламу та залежність від дозування. Адсорбція ж характеризується високою селективністю, регенерацією сорбентів та відсутністю побічних продуктів. Для цього методу показники продуктивності за ХСК ~80-94%, БСК ~30-90%, NH_4^+ ~ 20-95%, важкі метали ~60-99% [16]. Недоліками цього методу є висока вартість та генерація відпрацьованих сполук металів. Дуже важливою властивістю для електрохімічного методу є його автоматизація та відсутність хімікатичних реагентів. Але енергоспоживання та корозія електродів є його негативними відмінностями. Його дієвість може досягати для ХСК ~68-98%, БСК ~70-81%, NH_4^+ ~ 99%, важкі метали ~84-93% [17]. Якщо нам потрібен фокус на NH_4^+ то краще обрати метод іонного обміну. При простоті цього методу виділяють вартість та чутливість до іонів, як недоліки. Проте його дієвість свідчить сама за себе: ХСК ~10-88%, БСК < 60%, NH_4^+ ~70-99%, важкі метали ~80-99% [12,19]. Перевагами методу хімічного окиснення є деградація стійких до розпаду сполук та низький відсоток шламу. Показники ХСК ~80%, NH_4^+ ~ 80-96% та виокремлюються такі недоліки, як утворення токсичних побічних продуктів та високе енергоспоживання [18].

Фізико–хімічні методи рекомендується використовувати для старого інфільтрату. Їх вибір залежить від поточних умов, локації, ресурсів, тощо.

Мембранні методи очищення інфільтрату. Для очищення інфільтрату можна використовувати й мембранні процеси, суть яких полягає у фільтруванні через спеціальну мембрану, яка пропускає рідину, але затримує іони, колоїди, органічні сполуки тощо. Використовуються різні типи мембранних процесів, які класифікуються за розміром пор: мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотній осмос. Кожен з них фокусується на різних видах забруднювачів та має відповідну ефективність [20]. Ці методи вважаються одними з найефективніших для очищення, особливо, для видалення солей, важких металів та мікро забруднювачів. Отже, метод мікрофільтрації, який характеризується простотою, виділяє великі суспендовані частки, має низький тиск та швидко забувається, малоефективно видаляє амоній, важкі метали. Показники даного методу дещо нижчі, у порівнянні з іншими методами, та можуть бути і у межах ~0-20% для ХСК, ~0-30% для БСК, NH_4^+ ~ 0-10% та важкі метали ~0-20% [20]. Дуже висока ефективність методу ультрафільтрації для колоїдів, бактерій, органічних речовин, помірний тиск зазначається для ХСК ~10-40%, БСК ~20-60%, NH_4^+ ~ 0-20%, важкі метали ~20-60% [20]. Нанофільтрація добре підходить для часткового видалення органічних речовин, має низьку енергозатратність. Ефективність для ХСК ~70-90%, БСК ~70-85%, NH_4^+ ~ 30-60%, важкі метали ~70-95% [21]. Цей метод має малий відсоток видалення амонію та утворює концентрат, що потребує утилізації. Зворотній осмос більш доцільно використовувати для видалення органічних речовин, солей та важких металів. Його ефективність сягає ХСК ~98%, БСК ~97%, NH_4^+ ~ 94%, важкі метали ~94-99% [21]. Проте, висока вартість та необхідність повітряного очищення вимагає врахувати ці недоліки при виборі методу.

Гібридні методи очищення інфільтрату. Для того, щоб досягти найкращого результату, застосовують комбінації біологічних з фізико–хімічними та мембранними технологіями. Таким чином, поєднання різних методів може давати набагато кращий результат очищення. Наприклад, метод біологічного очищення та нанофільтрації. Перевагами його є компактність, стабільність, ефективна органічна очистка та очищення іонів. Недоліками є його вартість, забивання мембран та виділення концентрату. Показники ефективності: ХСК ~93-99%, БСК ~90-99%, NH_4^+ ~90-99%, важкі метали ~90-99% [22]. Озонування та закритий осмос має високе біодеградування, сприяє покращенню біологічного очищення. При ефективності для ХСК ~80-95%, БСК ~50-95%, важких металів ~90% виділяються токсичні проміжні продукти [20]. Та й вартість значна, на відміну від

комбінації методів фітореMediaції та мембранних процесів, що являють собою дешеві природні біологічні очисники з ефективністю: ХСК ~95-99%, NH_4^+ ~90-99%, важкі метали ~60% [11]. Як недоліки, можна розглядати потребу у великій площі та сезонність. Електрохімічне та мембранне очищення характеризується такими перевагами, як висока біодеградація та низьке фільтраційне забруднення. При ефективності ~93-97% для ХСК, ~94-96% для БСК, NH_4^+ ~90-95% та важкі метали ~90% [23]. Також, необхідне джерело струму, випрацювання електродів та осад є його недоліками.

Знову ж таки, вибір оптимального методу залежить від вихідних параметрів. Потрібно брати до уваги зрілість сміттєзвалища, ресурси та умови. При правильній оптимізації та коректному налаштуванню параметрів витрати можна зменшити на 20-30%, а ефективність підвищити на 40%.

Вибір оптимального методу очищення

Таблиця 3

Еколого–економічна оцінка методів очищення інфільтрату сміттєзвалищ

Метод очищення	Ступінь очищення, %	Капітальні витрати, млн грн	Поточні витрати, грн/м ³	Енергоспоживання, кВт·год/м ³	Екологічний ефект	Економічна доцільність
Біологічні (аеробні/анаеробні)	60-85	2.5-4.0	25-40	0.3-0.6	Зменшення БСК, ХСК, NH_4^+	Висока для малих/середніх полігонів
Фізико–хімічні (коагуляція, окиснення)	70-90	3.0-5.5	45-70	0.6-1.0	Видалення металів, кольоровості	Середня, залежить від реагентів
Мембранні	90-99	6.0-9.0	80-120	1.2-2.0	Максимальне очищення	Низька без попередньої очистки
Гібридні (біологічна+мембрани)	95-99	4.5-6.5	50-75	0.8-1.2	Комплексне видалення забруднень	Найбільш оптимальна

Еколого–економічні показники приведені до умов Стадницького полігону (поблизу м. Вінниця), за вихідних умов – орієнтовно 150 м³/добу інфільтрату, високий вміст органіки та NH_4^+ . Найбільш екологічно та економічно оптимальним для умов України є гібридний метод (біологічна очистка разом з мембранною доочисткою), оскільки він забезпечує високий ступінь очищення (до 99%) при помірних витратах і дозволяє адаптувати систему до змінного складу інфільтрату старих сміттєзвалищ.

Вибір оптимального методу очищення є дуже важливим. Адже саме правильність вибору, згідно усіх вхідних параметрів та навколишніх умов, забезпечить максимальну ефективність очищення. Для прикладу, розглянемо полігон, якому близько 30 років, яких переважна більшість в Україні. Відповідно, для старого полігону фільтрат, очікувано, має високий рівень ХСК та низький БСК. Для такого типу фільтрату типово, що коагуляція добре зменшує зважені/колоїдні частки, знебарвлює, видаляє частину ХСК та фосфати. Отже, більш доцільним буде обрання саме комбінації фізико–хімічного та електрохімічного методу, а не, наприклад, біологічного. Для такого фільтрату, при початковій ХСК ~5000 мг/л та БСК ~300 мг/л можна досягти кінцевого результату приблизно у ~1500 мг/л для ХСК та ~90 мг/л для БСК при ефективності 70%. Звичайно, це лише теоретичні розрахунки. Для більш точного вибору проводять еколого–економічний аналіз з урахуванням усіх умов та параметрів. Цей розрахунок охоплює усі стадії очищення при наявних ресурсах. Основними показниками, якими оперують під час розрахунків, є річний обсяг фільтрату, площа полігону, потужність системи очищення, параметри фільтрату та інші. Під час аналізу розраховуються масові потоки забруднень, вихідні показники після кожного етапу очищення, маса кожного компонента фільтрату, фізична екологічна вигода, економічна вигода та інші показники, які дають детальне представлення про обраний метод та доцільність його у тих чи інших умовах. Враховуються капітальні витрати, податки, можливі субсидії та проводиться планування на встановлений термін з урахуванням тарифів на енергію, інструменти та інші розхідні компоненти, що потрібні для ефективної роботи методу.

Висновки

Отже, проблема очищення інфільтрату сміттєзвалища досить ретельно досліджується у всьому

світі, а наслідки від забруднення можуть бути дуже негативні як для людей, так і для навколишнього середовища. На сьогоднішній день існують різні методи очищення інфільтрату: біологічні, фізико-хімічні, мембранні та гібридні. Кожен з цих груп методів має свої переваги та недоліки. Вибір методу напряму впливає на вихідні умови, ресурси, які є в наявності, параметри сміттєзвалища та цільові забруднення, які ми хочемо очистити або зменшити їх частку. У більшості випадків варто використовувати гібридні методи очищення саме через поєднання переваг різних методів, що покривають їхні недоліки. Завдяки цьому досягається більша ефективність та покривається більший спектр забруднювачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] H. I. Abdel-Shafy, A. M. Ibrahim, A. M. Al-Sulaiman, and R. A. Okasha, "Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, p. 102293, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>.
- [2] Nicholene Muzimbwa Likando, C. Dornack, and Josefina Tulimevava Hamutoko, "Assessing the physicochemical parameters of leachate from biowaste fractions in a laboratory setting, using the elusion method," *Environmental earth sciences*, vol. 82, no. 24, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11170-0>.
- [3] D. Şentürk, "Comprehensive meta analysis of worldwide landfill leachate a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in environmental engineering," 2022. Accessed: Oct. 23, 2025. [Online]. Available: <https://open.metu.edu.tr/bitstream/handle/11511/98517/10473247.pdf>
- [4] A. Wdowczyk and A. Szymańska-Pulikowska, "Comparison of Landfill Leachate Properties by LPI and Phytotoxicity-A Case Study," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 9, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.693112>.
- [5] N. Remmas, N. Manfe, I. Zerva, P. Melidis, R. Raga, and S. Ntougias, "A Critical Review on the Microbial Ecology of Landfill Leachate Treatment Systems," *Sustainability*, vol. 15, no. 2, p. 949, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15020949>.
- [6] M. Umar, Hamidi Abdul Aziz, and Mohd Suffian Yusoff, "Variability in the Concentration of Indicator Bacteria in Landfill Leachate - A Comparative Study," *Water Environment Research*, vol. 87, no. 3, pp. 223–226, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.2175/106143015x14212658613118>.
- [7] Y. Zegzouti et al., "Screening and selection of autochthonous fungi from leachate contaminated-soil for bioremediation of different types of leachate," *Environmental Engineering Research*, vol. 25, no. 5, pp. 722–734, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.317>.
- [8] K. Wang, L. Li, F. Tan, and D. Wu, "Treatment of Landfill Leachate Using Activated Sludge Technology: A Review," *Archaea*, vol. 2018, pp. 1–10, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/1039453>.
- [9] Nur et al., "State of the Art in Anaerobic Treatment of Landfill Leachate: A Review on Integrated System, Additive Substances, and Machine Learning Application," *Water (Basel)*, vol. 15, no. 7, pp. 1303–1303, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/w15071303>.
- [10] Y. Ren, F. M. Ferraz, Abbass Jafari Kang, and Q. Yuan, "Treatment of old landfill leachate with high ammonium content using aerobic granular sludge," *Journal of Biological Engineering*, vol. 11, no. 1, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1186/s13036-017-0085-0>.
- [11] I. Ntountounakis, I.-E. Margaritou, I. Pervelis, P. Kyrou, P. Parlakidis, and G. D. Gikas, "Pollutant Removal Efficiency of Pilot-Scale Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Treating Landfill Leachate," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 5, p. 2595, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/app15052595>.
- [12] J. Wang and Z. Qiao, "A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 12, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>.
- [13] A. J. Hargreaves et al., "Coagulation–flocculation process with metal salts, synthetic polymers and biopolymers for the removal of trace metals (Cu, Pb, Ni, Zn) from municipal wastewater," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 20, no. 2, pp. 393–402, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1481-3>.
- [14] A. D. Zand and M. R. Abyaneh, "Adsorption of Lead, manganese, and copper onto biochar in landfill leachate: implication of non-linear regression analysis," *Sustainable Environment Research*, vol. 30, no. 1, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00061-9>.
- [15] Maryam Rabiee Abyaneh, Gholamreza Nabi Bidhendi, and Ali Daryabeigi Zand, "Pb(II), Cd(II), and Mn(II) adsorption onto pruning-derived biochar: physicochemical characterization, modeling and application in real landfill leachate," *Scientific reports*, vol. 14, no. 1, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54028-6>.
- [16] N. A. Gomes et al., "Adsorption of pollutants in sanitary landfill leachate using granular activated carbon and bentonite clay," *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, vol. 248, pp. 111–123, 2022, doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28125>.
- [17] Aysenur Ogedey and E. Oguz, "Application of electrocoagulation process for the disposal of XCK, NH₃-N and turbidity from the intermediate sanitary landfill leachate," *Environmental science and pollution research international*, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31937-7>.
- [18] A. Kamal et al., "Biological Treatment, Advanced Oxidation and Membrane Separation for Landfill Leachate Treatment: A Review," *Sustainability*, vol. 14, no. 21, pp. 14427–14427, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su142114427>.
- [19] V. Torretta, N. Ferronato, I. Katsoyiannis, A. Tolkou, and M. Airolidi, "Novel and Conventional Technologies for Landfill Leachates Treatment: A Review," *Sustainability*, vol. 9, no. 1, p. 9, Dec. 2016, doi: <https://doi.org/10.3390/su9010009>.
- [20] E. Coppini, L. Palli, D. Fibbi, and R. Gori, "Long-Term Performance of a Full-Scale Membrane Plant for Landfill Leachate Pretreatment: A Case Study," *Membranes*, vol. 8, no. 3, p. 52, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/membranes8030052>.

[21] None Lokesh Sapkota, None Rajendra Joshi, None Anish Ghimire, None Lakisha Shrestha, None Sophie Shrees, and None Bikash Adhikari, "Landfill Leachate: Review of various treatment approaches," *Journal of innovations in engineering education*, vol. 6, no. 1, pp. 34–44, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.3126/jiee.v6i1.59091>.

[22] Ender Çetin, Vahit Balahorlu, and Sevgi Güneş-Durak, "Hybrid MBR–NF Treatment of Landfill Leachate and ANN-Based Effluent Prediction," *Processes*, vol. 13, no. 6, pp. 1776–1776, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/pr13061776>.

[23] D. Herranz et al., "Application of Crosslinked Polybenzimidazole-Poly(Vinyl Benzyl Chloride) Anion Exchange Membranes in Direct Ethanol Fuel Cells," *Membranes*, vol. 10, no. 11, pp. 349–349, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/membranes10110349>.

[24] A. Rajasekar, R. Sekar, E. Medina-Roldán, J. Bridge, C. K. S. Moy, and S. Wilkinson, "Next-generation sequencing showing potential leachate influence on bacterial communities around a landfill in China," *Canadian Journal of Microbiology*, vol. 64, no. 8, pp. 537–549, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1139/cjm-2017-0543>

[25] A. Wdowczyk and A. Szymańska-Pulikowska, "Analysis of the possibility of conducting a comprehensive assessment of landfill leachate contamination using physicochemical indicators and toxicity test," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 221, p. 112434, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112434>

[26] S. F. Ramli et al., "Reduction of COD and Highly Coloured Mature Landfill Leachate by Tin Tetrachloride with Rubber Seed and Polyacrylamide," *Water*, vol. 13, no. 21, p. 3062, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/w13213062>

[27] F. Kamaruddin, M. Emmanuel, and I. Pakir, "Activated carbon for landfill leachate treatment: A review," *International Journal of Development and Sustainability*, vol. 8, no. 1, pp. 19–29, 2019, Available: https://www.isdsnet.com/ijds-v8n1-02.pdf?utm_source=chatgpt.com. [Accessed: Dec. 04, 2025]

[28] L.E. Tymurova, V.V. Faichuk, M.V. Katkov, and L.P. Pashkevych, "A New System of Using Bioplateau for Cleaning Rivers in the Mountain Runway Formation Area," *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 179, no. 2, pp. 32–38, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-32-38>.

Файчук Володимир Валерійович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: fajjchuk@gmail.com.

Петрук Роман Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: prrom07@gmail.com, [https://orcid.org/0000-0002-5128-4053/](https://orcid.org/0000-0002-5128-4053)

V. Faichuk
R. Petruk

ANALYSIS OF METHODS FOR TREATING LANDFILL LEACHATE

Vinnytsia National Technical University

This article provides a comprehensive analysis of the possibilities of using various methods of landfill leachate treatment, including biological, physicochemical, membrane, and hybrid approaches. The main parameters and characteristics of landfill leachate are presented in detail, allowing for a better understanding of its complex and variable composition. Based on an extensive review of the scientific literature, the study identifies and systematizes treatment methods that are currently available and applicable in Ukraine. Particular attention is paid to the practical implementation of these methods, and the results are examined using real-life examples of leachate and similar wastewater treatment processes.

The effectiveness of each method is evaluated, with a clear presentation of their advantages and disadvantages under different operating conditions. Furthermore, the methods are compared according to key indicators such as biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), ammonium nitrogen concentration, and the presence of heavy metals. This comparative analysis allows for a more objective assessment of their performance and suitability.

The study also considers the influence of landfill age on leachate composition and, consequently, on the efficiency of treatment methods. A classification of landfills by age is provided, along with an analysis of how this factor affects leachate formation and properties. In addition, the bacteriological characteristics of landfill leachate are examined in detail, including the presence of microorganisms such as bacteria, pathogens, fungi, and other microbial communities.

The environmental impact of leachate and the associated risks are identified and discussed. Based on the conducted analysis, the study concludes that hybrid treatment methods are the most appropriate option, as they combine the advantages of different approaches, offer greater flexibility, and demonstrate higher overall efficiency in treating landfill leachate under varying conditions.

Keywords: Environmental protection technologies, landfill leachate treatment, organic compounds, environmental pollution, biological methods, membrane methods, physicochemical methods, hybrid treatment, waste management.

Faichuk Volodymyr V. — Postgraduate student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: fajjchuk@gmail.com.

Petruk Roman V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: prrom07@gmail.com, [https://orcid.org/0000-0002-5128-4053/](https://orcid.org/0000-0002-5128-4053)