
ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ

УДК [628.31:628.472.3](542.87+544.725.2)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.28>

КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ВОД ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ КОМУНАЛЬНИХ ВІДХОДІВ

Кучерук Д.Д., Балакіна М.М.

Інститут колоїдної хімії та хімії води імені А. В. Думанського

Національної академії наук України

бульв. Академіка Вернадського, 42, Київ, 03142

bantam@ukr.net

Утворення фільтраційних вод, які містять численні та в значних кількостях компоненти розпаду токсичних неорганічних і мінеральних речовин, є найважливішою проблемою, що виникає при експлуатації полігонів захоронення твердих комунальних відходів. Проникаючи в ґрунтові та поверхневі води, фільтрати негативно впливають на рослинність, тварин і людину, при цьому ґрунтові води здатні спровокувати забруднення величезної території. Особливості формування фільтратів, їх багатокомпонентний хімічний склад, який змінюється протягом життєвого циклу полігону, значна відмінність від промислових і міських стічних вод обумовлюють складність знешкодження фільтратів і необхідність розробки методологічних і концептуальних підходів вирішення цієї проблеми, проте в зв'язку з відмінностями в складі забруднень і їх концентрацій на різних полігонах, для кожного конкретного полігону необхідно проведення комплексу досліджень і розробка власної схеми знешкодження.

Проведені дослідження застосовності гальванокоагуляції, низьконапірного зворотного осмосу й електродіалізного концентрування з використанням електродіалізатора-концентратора удосконаленої конструкції дозволили створити наукові засади знешкодження та переробки багатокомпонентних токсичних фільтратів «старих» і стабілізованих полігонів захоронення твердих комунальних відходів до нормативних показників, на основі чого були запропоновані принципові блок-схеми комплексної переробки фільтраційних вод полігонів ТКВ. Схеми базуються на гнучкому блочному принципі, в основу якого покладено використання двох мембранних методів – електродіалізу та зворотного осмосу, що успішно доповнюють один одного. Цим блоком передують інші блоки, що призначені для домембранної обробки фільтратів: механічного очищення для затримання завислих речовин; гальванокоагуляції для очищення від органічних поллютантів; адсорбційного фінішного видалення низькомолекулярних органічних речовин; реагентного видалення амонію; знезараження УФ-опромінюванням; мікрофільтрації для тонкого очищення від завислих часток з метою захисту мембранних елементів перед подачею фільтрату, що підлягає очищенню, на мембранний блок.

Значна увага приділена не тільки очищенню фільтратів, але й комплексній переробці виділених при очищенні компонентів. *Ключові слова:* фільтрати полігонів твердих комунальних відходів, гальванокоагуляція, низьконапірний зворотний осмос, електродіаліз.

The complex treatment of filtration waters of solid municipal waste landfills. Kucheruk D., Balakina M.

The most important problem of operating landfills disposal of solid waste is the formation of landfill leachate that contains numerous and in significant quantities the components of decomposition of toxic inorganic and mineral substances. Landfill leachate negatively effect on vegetation, animals and people, groundwater contamination is able to trigger a vast territory by penetrating into the groundwater and surface water. Peculiar properties of landfill leachates such as multi-component chemical composition that changes throughout the life cycle of the landfill and a significant difference from industrial and municipal wastewater determine the complexity decontamination landfill leachates and the necessity to develop methodological and conceptual approaches to solve this problem. However, it is necessary to conduct complex research and develop their own decontamination schemes due to differences in the composition of contaminants and their concentrations for each landfill.

The conducted researches of the applicability of galvanic coagulation, low-pressure reverse osmosis and electrodialysis concentration with the use of an electrodialyzer-concentrator of advanced design allowed to create a scientific basis of disposal and processing of multicomponent toxic filtrates of «old» and stabilized landfills for municipal solid waste to the normative indicators, on the basis of which the circuit block schemes of complex processing of leachates for solid municipal waste landfills were proposed. Schemes are based on a flexible block principle, which are substructured on application of two membrane methods- electrodialysis and reverse osmosis successfully complement each other. These blocks are preceded by other blocks intended for pre-membrane treatment of leachate: mechanical treatment for the retention of suspended solids; galvanic coagulation for purification from organic pollutants; adsorption finishing removal of low molecular weight organic substances; reagent removal of ammonium; UV irradiation disinfection; microfiltration for delicate purification of suspended particles in order to protect the membrane elements before submitting the leachate to be purified by membrane unit.

Considerable attention has been not only landfill leachates purification but also the complex processing of components allocated by refinement. *Key words:* landfills leachates, galvanic coagulation, low-pressure reverse osmosis, electrodialysis.

Постановка проблеми. Відходи життєдіяльності людини є глобальною екологічною проблемою. Сучасна кількість створюваних відходів величезна – об'єм світових полігонів і звалищ росте зі швидкістю двох трильйонів тонн на рік. На території нашої країни щорічно утворюється близько 50 млн м³ побутових відходів. До речі, Україна відноситься до десятки країн з найбільшим об'ємом сміття на одного мешканця.

Найбільш поширеним способом поводження з комунальними відходами в світовій практиці до теперішнього часу є їх складування на полігонах захоронення твердих комунальних відходів (ТКВ). Так, в Україні захоронюють майже всі відходи – 94,4 %, і тільки 2,4 % спалюють і 3,09 % – переробляють.

Актуальність дослідження. Полігони ТКВ є об'єктами високого екологічного ризику. В процесі їх експлуатації утворюються екологічно небезпечні високонцентровані за мінеральними й органічними речовинами стічні води – фільтрати.

Проникаючи в ґрунтові та поверхневі води, фільтрати негативно впливають на рослинність, тварин і людину, при цьому ґрунтові води здатні спровокувати забруднення величезної території. Особливості формування фільтратів, їх багатокомпонентний хімічний склад, який змінюється протягом життєвого циклу полігону, значна відмінність від промислових і міських стічних вод обумовлюють складність знешкодження фільтратів і необхідність розробки методологічних і концептуальних підходів вирішення цієї проблеми, проте в зв'язку з відмінностями в складі забруднень і їх концентрацій на різних полігонах, для кожного конкретного полігону необхідно проведення комплексу досліджень і розробка власної схеми знешкодження.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконувалася у рамках проектів «Розробка технології знешкодження стічної води звалищ у с. Пирогове та с. В. Дмитровичі», «Розробка технології знешкодження фільтратів звалищ побутових відходів», «Розробка фізико-хімічних основ комплексної переробки стічних вод звалищ твердих побутових відходів», «Дослідження процесів виділення солей з концентратів, одержаних при обробці стічних вод звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) електродіалізом. Розробка технологічної схеми утилізації концентратів стічних вод звалищ ТПВ».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом багатьох років як найбільш придатні для очищення фільтратів полігонів ТКВ розглядалися звичайні біологічні методи та класичні фізико-хімічні. Проте неорганічні домішки фільтратів не видаляються зазначеними методами. Більш того, останніми роками в зв'язку з безперервним посиленням стандартів на очищення фільтратів у більшості країн і необхідністю зменшення негативного впливу фільтратів полігонів на навколишнє середовище тради-

ційні методи їх знешкодження не дозволяють досягти потрібного результату не тільки за вмістом солей.

Альтернативним біологічним методом варіантом є використання для очищення фільтратів полігонів зворотноосмотичної технології, яка в світовій практиці вважається найбільш перспективною для полігонів, які будуються.

Вперше зворотний осмос (ЗО) при очищенні фільтратів полігонів ТКВ був застосований у 1984 році у Швейцарії [1; 2]. На даний момент зворотноосмотична технологія вже широко використовується в згаданій сфері в країнах Західної Європи, США й Японії [3; 4]. Це пояснюється тими незаперечними перевагами, які зворотний осмос має перед іншими процесами розділення. Його відрізняє простота конструкцій апаратів при малих габаритах і можливість масштабування, а також легкість поєднання з іншими технологічними процесами, нескладність експлуатації та контролю, надійність і висока ефективність, відсутність необхідності введення додаткових хімічних реагентів, якщо не враховувати невеликих витрат для коригування рН, інгібування солевідкладень і періодичної регенерації мембран. Масоперенесення крізь мембрану при ЗО, як правило, відбувається без хімічних і фазових перетворень і потребує витрат енергії тільки на прокачування розчину вздовж мембрани та продавлювання крізь неї розчинника. ЗО може застосовуватися для знесолення вод із солевмістом до 40 г/дм³, причому межі його використання постійно розширюються [5; 6].

Доцільність використання технології ЗО при знешкодженні фільтратів полігонів підтверджує широке застосування систем PALL-ROCHEM. Перша одноступенева установка PALL-ROCHEM розпочала роботу в 1986 р. на полігоні, розташованому в 40 км від м. Карлсруе. В разі невідповідності якості очищеного фільтрату вимогам на очищення стічних вод використовується двоступенева схема. Зниження хімічного споживання кисню (ХСК) при обробці фільтрату за одноступеневою схемою становить 86,5, двоступеневою – 99,45 [7].

Показником широти застосування методу ЗО слугує той факт, що установки лише компанії PALL-ROCHEM працюють більше, ніж на 350 полігонах світу [8], у тому числі в Західній Європі на найбільших полігонах Німеччини (Іленберг, Гагше-Лохау, Гамбург, Дортмунд-Ност, Хекстер, Хохзауерландкір та ін.), полігони в Австрії (Інсбрук, Рідерберг), Англії (Манчестер), Італії, Франції, Бельгії та ін. [8–11]. На Київському полігоні ТКВ № 5 єдина в Україні двоступенева установка PALL ROCHEM працює з 1998 р. [12].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Основним недоліком зворотного осмосу вважається утворення при знесоленні крім очищеної води концентрату із солевмістом більш високим, ніж вихідна вода, проте недостатнім для подальшої

переробки. Крім того, майже не приділяється уваги питанню попереднього очищення фільтратів перед мембранною обробкою. Також, як правило, залишається відкритим питання переробки виділених при очищенні речовин – як правило, схеми очищення фільтратів ТКВ закінчуються стрілками з написом «на переробку», без уточнення на яку саме.

Крім того, екологічні методи знесолення води – зворотний осмос і електродіаліз перед подачею на мембрани потребують попереднього очищення вихідної води від сполук органічної природи з метою попередження забруднення мембран.

Новизна полягає у науковому обґрунтуванні та реалізації методів знешкодження висококонцентрованих токсичних фільтратів полігонів ТКВ та їх реалізації на реальному об'єкті, що дозволило запропонувати принципові блок-схеми комплексної переробки фільтраційних вод полігонів ТКВ, які базуються на гнучкому принципі, в основу якого покладено використання двох мембранних методів – електродіалізу та зворотного осмосу з попередньою домембранною обробкою фільтратів; також запропонована переробка одержаних шламів на вторинні матеріальні ресурси.

Загальнонаукове значення. Метою роботи було створення концепції розробки принципових схем комплексної переробки фільтратів полігонів ТКВ, яка базується на гнучкому блоковому принципі, що дозволяло б варіювати кількістю та порядком розташування блоків залежно від складу фільтрату. Для реалізації поставленої мети були використані попередньо виконані експериментальні дослідження, на основі яких була здійснена спроба створення наукових основ знешкодження та переробки токсичних багатокомпонентних висококонцентрованих за неорганічними й органічними складовими фільтратів полігонів ТКВ до нормативних показників на основі раціонального поєднання комплексу електрохімічних і мембранних процесів.

Викладення основного матеріалу. Попередньо проведені дослідження показали:

- що низьконапірний зворотний осмос може бути цілком успішно використаний при очищенні фільтратів полігонів ТКВ [13–16];

- доцільність застосування для домембранного очищення фільтратів полігонів ТКВ методу гальванокоагуляції в поєднанні з каталітичним окисненням [17];

- можливість зв'язування іонів амонію, що звичайно містяться в фільтратах ТКВ у значній кількості та при цьому незадовільно затримуються зворотньоосмотичними мембранами, у струв'ї [18];

- використання електродіалізатора удосконаленої конструкції дозволяє ефективно концентрувати ретентат зворотного осмосу для полегшення його подальшої переробки [19].

На основі аналізу та узагальнення отриманих результатів була запропонована концепція розробки

принципових схем комплексної переробки фільтратів ТКВ, які базуються на гнучкому блоковому принципі, що дозволяє варіювати кількістю та порядком розташування блоків залежно від складу фільтрату. Запропоновані схеми базуються на використанні двох мембранних методів – зворотного осмосу й електродіалізу. Всі інші методи і обладнання, що тим або іншим чином забезпечують вирішення поставлених завдань, можуть доповнювати зазначені блоки з урахуванням складу конкретних фільтраційних вод.

Передбачені схеми можуть включати такі блоки:

- 1. Блок механічного очищення,** призначений для затримування завислих забруднюючих домішок.

- 2. Блок гальванокоагуляції.** Дозволяє знизити на 70–80 % вміст органічних домішок (за ХСК) у фільтраті полігону, практично повністю видалити іони кольорових металів, алюмінію, свинцю, нітритів та сульфідів, зменшити вміст іонів кальцію, магнію, хлоридів, сульфатів, фосфатів і аніонних поверхнево-активних речовин, а також забезпечити глибоке знезараження.

- 3. Блок реагентного видалення амонію.** Дозволяє зменшити його вміст більше, ніж на 90 %, і одночасно на 15–17 % – вміст органічних сполук.

- 4. Адсорбційний блок.** Його необхідність викликана наявністю в фільтраті полігонів відносно низькомолекулярних органічних речовин, які не видаляються коагуляцією та зворотним осмосом.

- 5. Блок знезараження УФ-опромінуванням.**

- 6. Блок мікрофільтрації.** Призначений для тонкого механічного очищення від завислих частинок розміром $<0,05$ мкм з метою захисту мембранних елементів перед подачею очищуваного фільтрату на мембранний блок.

- 7. Блок низьконапірного зворотного осмосу.** Призначений для знесолення попередньо очищеного від органічних і амонійних сполук фільтрату полігону.

- 8. Блок електродіалізу** із застосуванням електродіалізатора-концентратора (ЕДК) удосконаленої конструкції. Може бути використаний як для знесолення фільтрату полігону, так і для глибокого концентрування ретентату зворотного осмосу з метою його подальшої переробки.

При концентруванні фільтрату полігону в ЕДК утворюються два типи розсолів: розсіл 1 із вмістом переважно хлориду та сульфату натрію та розсіл 2, де присутні хлориди катіонів фільтрату. Розділення хлоридів і сульфатів розсолу передбачено здійснювати кристалізацією.

- 9. Блок кристалізації,** де у тверду фазу виділяється 90–95 % сульфату натрію, тоді як маточний розчин містить в основному хлорид натрію.

- 10. Блок електролізного одержання гіпохлоритів** з маточного розчину.

Застосування перелічених процесів в очищенні досліджених фільтраційних вод київських полігонів № 1 і № 5 подані нижче (у схемах наведені тільки основні вузли).

Полігон ТКВ № 5 м. Києва. За результатами аналізів зразків фільтрату полігону, що виконувалися у Науково-технічному центрі випробування води (НТЦВВ) Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України (ІКХХВ), загальна мінералізація становить ~ 13 г/дм³, вміст амонійних сполук 1700 мг/дм³ і більше, ХСК > 2000 мгО/дм³.

При зазначеному солемісті знесолення може бути здійснено як зворотним осмосом, так і електродіалізом. І в першому, і в другому випадках вміст амонійних сполук і значення ХСК припускають домембранне їх видалення.

Ретентат, що утворився після знесоленні фільтрату на **зворотноосмотичному блоці** надходить до **електродіалізного блока**, де утворюються два концентровані розсоли – розсіл 1 із вмістом переважно солей одновалентних катіонів і розсіл 2, який містить хлориди присутніх у фільтраті катіонів. Діалізат, що утворився, подається до **зворотноосмотичного блока**, і схема очищення фільтрату полігону ТКВ № 5 із застосування зворотноосмотичного знесолення може бути представлена схемою на рис. 1-А.

У ІКХХВ була виготовлена експериментальна установка продуктивністю 0,5 м³/год, і на основі результатів її роботи рішенням спільного засідання науково-технічних рад Держжитлокомунгоспу України та Київської міської адміністрації було рекомендовано здійснити заходи по створенню першої промислової установки продуктивністю до 10 м³/год для знешкодження фільтрату, що накопичений на полігоні № 5.

Проте, при тому солемісті, який має фільтрат після гальванокоагуляції та видалення амонійних сполук, можливий також варіант його обробки **електродіалізним знесоленням**. Розсоли, що утворюються при цьому, перероблюються аналогічно першому випадку (рис. 1-Б).

Полігон ТКВ № 1 м. Києва (с. Пирогове, у 1986 р. повністю закритий). За даними НТЦВВ ІКХХВ в цьому випадку загальна мінералізація фільтрату вища, ніж фільтрату полігону № 5 (~ 13 г/дм³), доволі високий показник ХСК (~ 2000 мгО/дм³), і нижча кількість іонів NH_4^+ (370 мг/дм³). Очевидно, що в даному випадку доцільніше видалити **амонійні сполуки** не з вихідного фільтрату, а з розсолу електродіалізного концентрування (рис. 2).

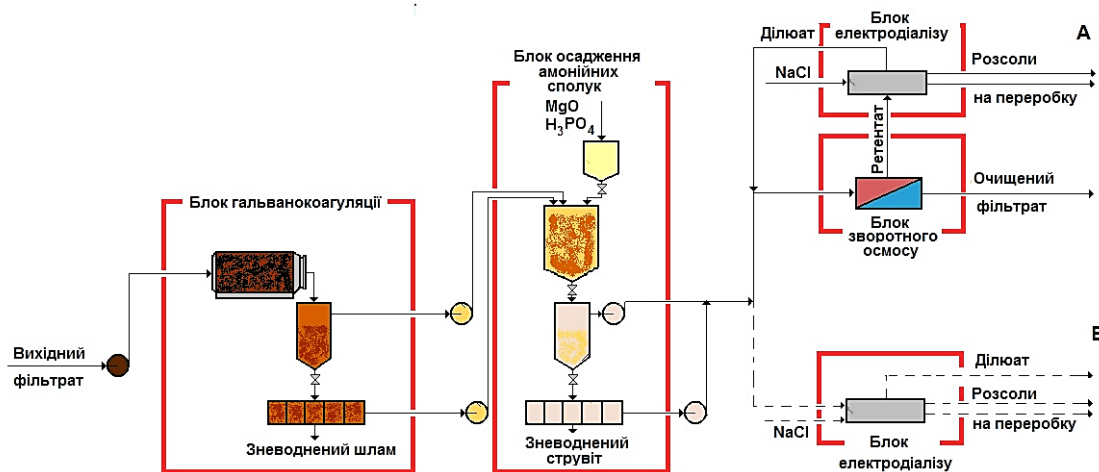


Рис. 1. Принципові блок-схеми комплексної переробки фільтрату Київського полігону ТКВ № 5

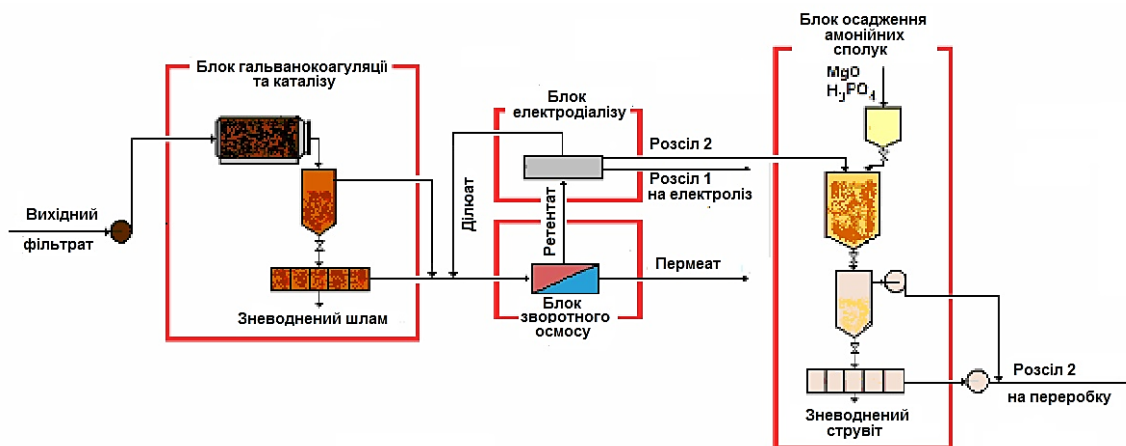


Рис. 2. Принципова блок-схема комплексної переробки фільтрату Київського полігону ТКВ № 1

Отримані дані можуть бути використані при виборі технологічних схем і прогнозуванні рівня очищення фільтраційних вод інших полігонів ТКВ. Так, для прикладу були обрані звалище м. Василькова Київської обл. і полігони ТКВ міст Львова та Сум.

Міське звалище м. Василькова. З даних, наведених у [20], випливає, що фільтрат має доволі високу загальну мінералізацію (>18 г/дм³), внаслідок чого після очищення фільтрату від органічних домішок і амонійних сполук знизити її зворотноосмотичним знесоленням до норм на скидання видається неможливим. Виходом може стати використання часткового електродіалізного знесолення фільтрату до солевмісту, який дозволить зворотним осмосом довести цей показник до регламентованих норм на скидання – електродіалізний блок все одно повинен бути наявним у схемі для концентрування зворотноосмотичного ретентату (рис. 3).

Львівський полігон ТКВ. За даними [21] солевміст фільтрату Львівського полігону ТКВ дуже близький до солевмісту фільтрату звалища м. Василькова (18 373 мг/дм³). Таким чином, навантаження на зворотноосмотичну мембрану повинно бути знижено за допомогою попереднього електро-

діалізного знесолення. Відносно невеликий вміст амонійних сполук (324 мг/дм³) вказує на більшу доцільність осадження їх не з вихідного фільтрату, а з електродіалізного розсолу, і тоді варіант схеми очищення для Львівського полігону дещо зміниться (рис. 4).

Полігон ТКВ м. Суми. Фільтрат Сумського полігону відрізняється високим солевмістом (25 937 г/дм³) і концентрацією амонійних сполук 2,5 г/дм³ [22].

Для знесолення розчину такого солевмісту зворотним осмосом необхідно використовувати мембрани високого тиску [23]. Проте, згідно з розрахунками авторів роботи [24], здійснення одноступеневого знесолення на мембрані високого тиску майже в 1,4 рази дорожче двоступеневого знесолення на низьконапірних мембранах за рахунок ультратонкого бар'єрного шару останніх. Таким чином, у даному випадку доцільніше використати два ступеня низьконапірного зворотного осмосу (рис. 5).

При розробленні схем значну увагу було приділено не тільки очищенню фільтратів, але і використанню виділених з них компонентів як вторинної сировини: шлам після гальванокоагуляції може бути використаний у виробництві залізооксидного

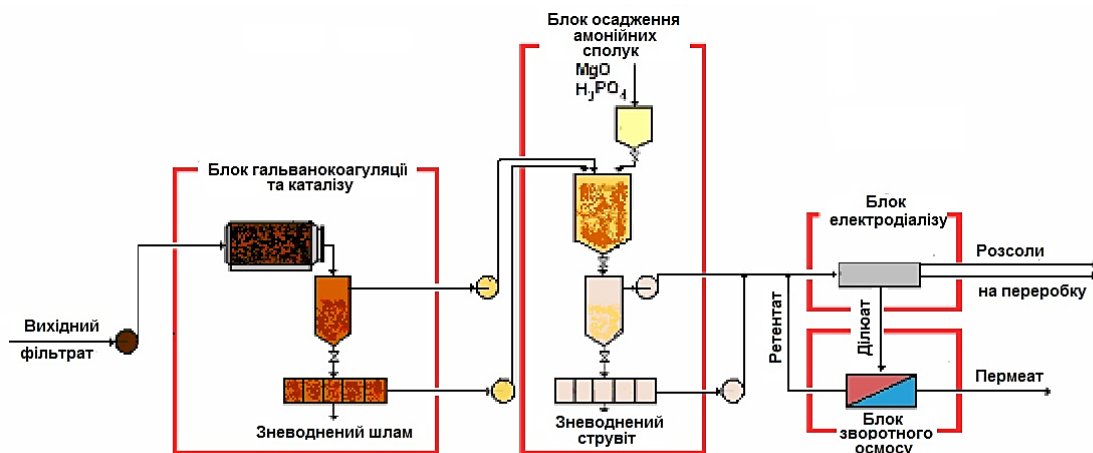


Рис. 3. Запропонована блок-схема комплексної переробки фільтрату звалища м. Василькова

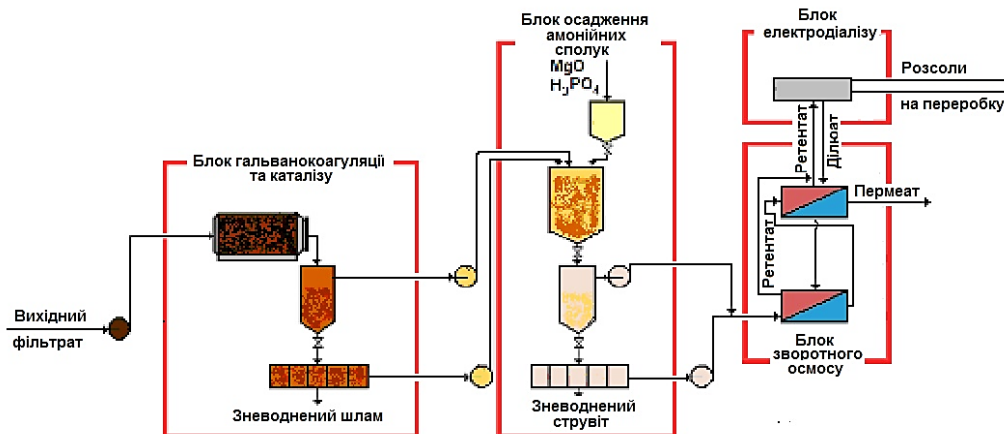


Рис. 4. Запропонована блок-схема комплексної переробки фільтрату Львівського полігону ТКВ

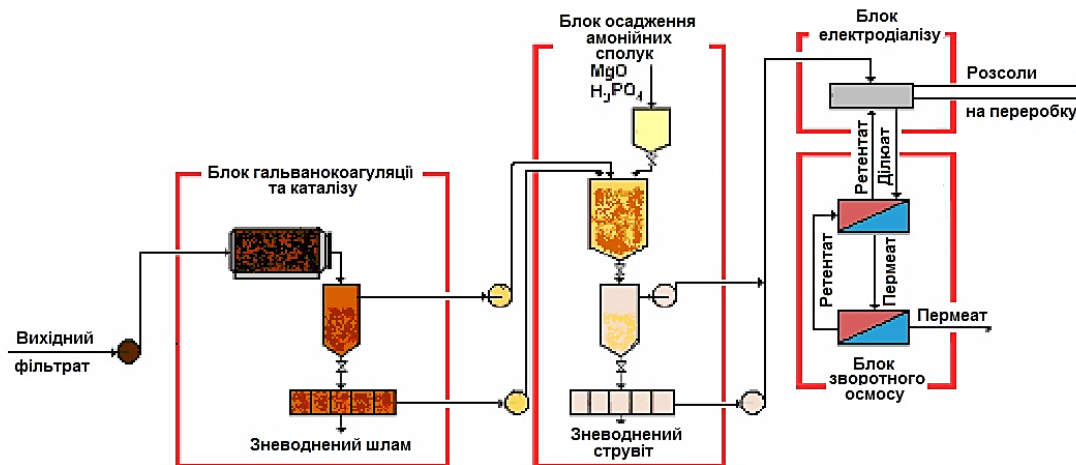


Рис. 5. Запропонована блок-схема комплексної переробки фільтрату Сумського полігону ТКВ

пігменту; продукт осадження амонію – для отримання комплексного мінерального добрива пролонгованої дії, що містить цінні поживні речовини – азот, фосфор і магній одночасно; з електродіалітичних розсолів кристалізацією може бути виділено 90–95 % сульфату натрію, який використовується, наприклад, при виробництві каустичної соди та скла; маточний розчин придатний для отримання хлору електролізом хлориду натрію. Також можлива його переробка на гіпохлорит, який може використовуватися безпосередньо на полігоні.

Головні висновки. Запропоновано концепцію створення принципових схем комплексної переробки фільтратів полігонів ТКВ, які базуються на гнучкому блочному принципі, в основу якого покладено використання двох мембранних методів – зворотного осмосу та електродіалізу, що успішно доповнюють один одного, з домембранною обробкою фільтратів методом гальванокоагуляції в поєднанні з ката-

літичним окисненням. Гнучкий блочний принцип дозволяє варіюванням кількістю та порядком розташування блоків принципової блок-схеми та прогнозувати рівень очищення фільтраційних вод полігонів ТКВ різного складу.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований підхід може бути використаний для фільтратів будь-яких «старих» (формуються приблизно через 10 років) і стабілізованих (стабільна фаза починається через 30–40 років від початку складування та триває до 100 років) полігонів. Проте його використання для фільтратів «молодих» полігонів (утворюються протягом перших 3–10 років) лімітоване високим вмістом органічних складових і великою концентрацією амонійних сполук, довести вміст яких до норм на скидання із застосуванням запропонованих методів не уявляється можливим. У цьому випадку слід надавати перевагу біологічним методам.

Література

1. Peters T. A. Purification of landfill leachate with membrane filtration. *Filtration and Separation*. 1998. V. 35, No 1. P. 33–36.
2. Yamada M., Soojung S. Application of reverse osmosis for landfill leachate treatment. *Journal of Environmental Conservation Engineering*. 2006. V. 35, No 3. P. 182–188. Краткий обзор современных методов очистки сточных вод. URL: <http://www.Vlr53.narod.Ru/och.htm> (дата звернення: 15.12.2019).
3. Kocurek P. New trends in landfill leachate. *Acta environmentalica universitatis comenianae*. 2011. V. 19. P. 174–178.
4. Водоподготовка : справочник / под ред. С. Е. Беликова. М. : Изд-во Аква-Терм, 2007. 240 с.
5. Тверской В. А. Мембранные процессы разделения. Полимерные мембраны. М. : ИПЦ МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2008. 59 с.
6. Краткое описание технологии и систем PALL ROCHEM. URL: serviceok.com.ua/media/pdf/pdf_pall_aria/1-2%обратный%20осмос.pdf (дата звернення: 25.04.20).
7. Ведяшкин А. С., Ахметова Н. Р. Опыт защиты поверхностных и грунтовых вод от загрязнения. *Известия Калининградского ГТУ*. 2009. № 15. С. 65–68.
8. Шлее Ю., Никогулов Х. Н., Ткачев А. А. Современные технологии строительства полигонов для захоронения отходов с использованием геосинтетических материалов. *Экология и промышленность России*. 2003. № 1. С. 18–22.
9. Минчукова Е. М. Современные системы гидроизоляции источников загрязнения окружающей среды. *Популярное бетоноведение*. 2008. № 11. С. 8–14.
10. Потапов П. А., Пупырев Е. И., Потапов А. Д. Методы локализации и обработки фильтрата полигонов захоронения твердых бытовых отходов: монография. М. : АСВ, 2004. 168 с.
11. Програма поводження з твердими побутовими відходами у м. Києві на період до 2011 року. URL: www/kmv.Gov.Ua/divinfo.asp?Id=214544 (дата звернення: 25.04.20).
12. Гончарук В. В. Зворотний осмос низького тиску і нанофільтрація в очищенні та знесоленні води / В. В. Гончарук,

- М. М. Балакіна, Д. Д. Кучерук та ін. *Доповіді НАН України*. 2005. № 2. С. 174–178.
13. Water purification of nitrates by low-pressure reverse osmosis method / V. V. Goncharuk, V. O. Osipenko, M. N. Balakina, D. D. Kucheruk. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2013. V. 35, N 2. P. 71–75.
14. Purification of waters containing fluorine by low pressure reverse osmosis for their complex treatment / V. V. Goncharuk, L. A. Deremeshko, M. N. Balakina, D. D. Kucheruk. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2013. V. 35, N 3. P. 122–127.
15. Балакіна М. М. Очищення стічних вод від амонійних сполук / М. М. Балакіна, Д. Д. Кучерук, З. М. Шкавро та ін. *Доповіді НАН України*. 2013. № 4. С. 167–171.
16. Galvanocoagulation in preliminary purification of leachate of landfills of solid household wastes / V. V. Goncharuk, M. N. Balakina, D. D. Kucheruk, I. Ya. Pishchai. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2010. V. 32, N 4. P. 235–241.
17. Balakina M. N. Reagent wastewater treatment from ammonium compounds. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2015. V. 37, N 3. P. 116–121.
18. Balakina M. N. Electrodialysis in integrated processing of leachate of solid waste landfills. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2015. V. 37, N 4. P. 179–184.
19. Шкрупська Ю. В. Проблеми техногенного впливу на геологічне середовище полігонів твердих побутових відходів. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2003. № 2/3. С. 73–75.
20. Хімічний склад Львівського полігону твердих побутових відходів / А. М. Гайдин, В. А. Дяків, В. Д. Погребенник, А. В. Пашук. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2013. № 10. С. 43–49.
21. Дослідження впливу полігонів ТПВ на навколишнє середовище URL: http://essuir.sumdu.edu.ua/bitst-tream/123456789/25370/1/poligony_TPV_Kalashnyk.pdf (дата звернення: 19.01.2021).
22. Первов А. Г. Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. М. : Изд-во АСВ, 2009. 232 с.
23. Десятов А. В. Влияние температуры на процесс обратноосмотического опреснения воды Каспийского моря / А. В. Десятов, А. В. Асеев, О. А. Подымова и др. *Серия. Критические технологии. Мембраны*. 2007. № 3 (35). С. 28–40.