

УДК 504.062

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.22>

ЗНЕВОДНЕННЯ ФІЛЬТРАТУ В ТЕХНОЛОГІЇ СУХОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ВІДХОДІВ

Моїсєєв В.Ф., Манойло Є.В., Василенко А.О., Лук'яненко М.А.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

Viktor.Moisieiev@khpi.edu.ua, Ievgeniia.Manoilo@khpi.edu.ua

У статті розглянуто проблему зневоднення фільтрату, що утворюється в результаті сухого анаеробного збродження органічної фракції твердих побутових відходів (ТПВ). Зазначено, що фільтрат містить велику кількість органічних домішок, поживних елементів та абразивних частинок, що ускладнює його обробку традиційними способами. Проблема обробки полягає у високій абразивності та комплексному складі фільтрату, який містить значні концентрації органічних речовин, амонійного азоту, фосфатів, піску й скла. Такі характеристики унеможливають ефективну роботу традиційних центрифуг і стрічкових пресів, що створює потребу у нових підходах до обробки.

У дослідженні вперше проведено оцінку роботи роликового дегідратору типу XJD у реальних промислових умовах. У роботі представлено результати пілотних випробувань роликового дегідратору типу XJD в умовах реального виробничого навантаження. Проаналізовано фізико-хімічні характеристики осаду, ефективність зневоднення та експлуатаційні особливості роликових пресів. Результати показали, що дегідратор забезпечує стабільне зневоднення навіть при високому вмісті абразивних часток і концентрації осаду 8–13,6%, досягаючи вмісту сухої речовини у кеці до 35,9%. Обґрунтовано технічну доцільність застосування цієї технології та обладнання у системах біологічної переробки відходів.

Отримані дані підтверджують технічну та економічну доцільність застосування роликових пресів у системах біологічної переробки ТПВ та відкривають перспективи повторного використання фільтрату у виробництві мінеральних добрив або для технічних потреб. Розроблений підхід сприяє формуванню замкнених циклів поводження з відходами, зменшенню екологічного навантаження та реалізації принципів сталого розвитку й циркулярної економіки. *Ключові слова:* утилізація, поводження з відходами, фільтрат, сухе збродження, зневоднення, роликовий прес, вторинне використання, циркулярна економіка.

Filtrate dewatering in dry waste fermentation technology. Moiseev V., Manoilo E., Vasylenko A., Lukianenko M.

The article discusses the problem of dehydration of filtrate formed as a result of dry anaerobic fermentation of the organic fraction of solid municipal waste. It is noted that the filtrate contains a large amount of organic impurities, nutrients, and abrasive particles, which complicates its treatment by traditional methods. The problem of treatment lies in the high abrasiveness and complex composition of the filtrate, which contains significant concentrations of organic substances, ammonium nitrogen, phosphates, sand, and glass. These characteristics make it impossible for traditional centrifuges and belt presses to work effectively, creating a need for new approaches to treatment.

The study is the first to evaluate the performance of an XJD roller dewatering machine in real industrial conditions. The paper presents the results of pilot tests of the roller dewatering machine under real production load conditions. The physicochemical characteristics of the sludge, the efficiency of dewatering, and the operational features of roller presses are analyzed. The results showed that the dehydrator provides stable dewatering even with a high content of abrasive particles and a sludge concentration of 8–13,6%, reaching a dry matter content in the cake of up to 35,9%. The technical feasibility of using this technology and equipment in biological waste treatment systems is justified.

The data obtained confirm the technical and economic feasibility of using roller presses in biological waste treatment systems and open up prospects for reusing filtrate in the production of mineral fertilizers or for technical needs. The developed approach contributes to the formation of closed waste management cycles, reduction of environmental impact, and implementation of the principles of sustainable development and circular economy. *Key words:* disposal, waste management, filtrate, dry fermentation, dewatering, roller press, reuse, circular economy.

Постановка проблеми. Щороку у світі утворюється понад 25–30 мільярдів тонн твердих і рідких відходів, включно з побутовими, промисловими залишками та осадами стічних вод. Значна частина з них – органічного походження. Через неефективну систему переробки, мільйони тонн відходів потрапляють на полігони, займаючи понад 5–7 мільйонів гектарів, з яких близько половини – продуктивні сільськогосподарські землі.

Тверді побутові відходи (ТПВ) стали постійним супутником урбанізованого життя. За даними Світового банку, вже у 2025 року один мешканець міста продукуватиме в середньому 1,42 кг ТПВ

щоденно, що майже вдвічі перевищує показники початку ХХІ століття. У країнах із низьким рівнем доходу понад 90% відходів вивозяться на стихійні сміттєзвалища або спалюються у відкритий спосіб, що спричиняє серйозні екологічні й санітарні наслідки.

Актуальність дослідження. Серед сучасних підходів до поводження з ТПВ особливу увагу привертає вилучення та переробка органічної фракції, яка в міських умовах становить 30–60% усієї маси. Найбільш поширеними методами її перетворення є компостування (аеробна стабілізація) та анаеробне збродження, яке забезпечує не лише зменшення

маси відходів, а й генерацію відновлюваної енергії у вигляді біогазу.

Однією з ефективних технологій анаеробного зброджування є сухий процес (dry fermentation), особливо придатний для ТПВ без потреби в додатковому зволоженні. Проте реалізація такої технології неминуче супроводжується утворенням рідкої фази (фільтрату), яка містить значні концентрації органічних речовин, амонійного азоту, фосфатів, калію, піску, частинок скла. Такий склад ускладнює зневоднення й унеможливує пряме скидання без попередньої обробки.

Складність зневоднення фільтрату посилюється низькою ефективністю або зношуваністю класичних рішень – зокрема, центрифуг та стрічкових пресів, які не витримують навантаження в умовах підвищеної абразивності. Це створює потребу у впровадженні технологій нового покоління, здатних поєднувати енергоефективність, стійкість до зносу та високу ефективність зневоднення.

Метою даного дослідження є експериментальна оцінка ефективності роликового пресу типу XJD для зневоднення фільтрату, отриманого після сухого зброджування органічної фракції ТПВ. У роботі представлено опис технологічної схеми, результати пілотних випробувань і технічні особливості впровадження обладнання в умовах реального підприємства. Особливу увагу приділено якісному складу фільтрату а також потенціалу подальшого використання осаду та рідкої фракції як вторинного ресурсу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.

Тема дослідження відповідає Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р) [1] а також є одним із наукових напрямів діяльності кафедри хімічна техніка та промислова екологія НТУ «ХПІ». Необхідність сталого поводження з всіма видами відходів, створення інструментів для запобігання зменшення обсягів утворених відходів закріплена у Національній доповіді «Цілі сталого розвитку: Україна» [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тверді побутові відходи (ТПВ) поділяються на органічні та неорганічні фракції. Органічні відходи становлять значну частку в загальному потоці ТПВ і включають харчові залишки, садові та зелені відходи, папір, картон, деревину тощо [3]. Ці компоненти є біологічно розкладними та можуть бути використані як сировина для виробництва компосту або біогазу. Натомість неорганічна частина (пластик, скло, метали) потребує окремих підходів до переробки або утилізації [4]. Морфологічний склад ТПВ залежить від регіону, сезону, рівня урбанізації, культури споживання та системи збору [5]. У містах України органічна фракція ТПВ становить у середньому від 30 до 60%. Ця фракція швидко піддається біохімічним процесам розкладу, що створює ризики для

довкілля: утворення фільтрату на полігонах, викиди парникових газів, забруднення ґрунту й води. Тому переробка органіки є пріоритетом у стратегіях сталого поводження з відходами [6].

До основних методів переробки органічних відходів належать: компостування (аеробне), анаеробне зброджування (вологе та сухе), термохімічне перетворення (піроліз, спалювання з енергетичною утилізацією) [7]. Найбільш поширеним у світі є компостування, оскільки воно не потребує складної інфраструктури. Однак анаеробне зброджування дозволяє не тільки стабілізувати органічну речовину, а й отримати біогаз як джерело відновлюваної енергії [8]. Сухе анаеробне зброджування є перспективною технологією для обробки органічної фракції ТПВ, особливо коли вміст сухої речовини у субстраті перевищує 20–25%. У таких умовах класичні рідкі ферментери не є ефективними. У реакторах сухого типу (plug-flow digesters) матеріал не перемішується, процес іде при мінімальній волозії, з утворенням біогазу і залишкового дигестату [9]. Фільтрат, що утворюється після сепарації дигестату, має високу концентрацію органічних речовин, амонійного азоту, фосфатів, калію, а також містить пісок і склобій, які потрапляють у масу з відходами [10]. Це суттєво ускладнює використання класичних технологій очищення. Фільтрат є токсичним, має високий показник ХСК, і при потрапленні у довкілля викликає ризики евтрофікації водойм, забруднення ґрунтових вод і неприємні запахи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У роботі відзначено, що проблема зневоднення фільтрату після сухого анаеробного зброджування органічної фракції ТПВ залишається слабо дослідженою. Традиційні методи (центрифуги, стрічкові преси) не витримують навантажень у середовищі з високою абразивністю, а ефективних рішень для переробки фільтрату складного складу немає. Тому дослідження спрямоване на пошук технології, здатної забезпечити стабільне зневоднення й повторне використання фільтрату.

Новизна. У представлений роботі авторами запропоновано використання роликового дегідратору для обробки фільтрату після сухого зброджування, проведена експериментальна оцінка ефективності роботи цієї установки в реальних виробничих умовах та доведена можливість повторного використання фільтрату як вторинного ресурсу. Розроблений підхід охоплює як технологічну, так і екологічну складову зазначеної проблеми дослідження.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічна основа дослідження охоплює поетапну систему аналізу, формує практичну базу для масштабування технології зневоднення фільтрату та робить внесок у розвиток циркулярної економіки через повторне використання рідкої фракції. Дослідження закладає основу для розробки процесів механічної обробки абразивних осадів.

Методика дослідження. Дослідження здійснювалось у три етапи: аналітичному, лабораторному та експериментально-прикладному, що дозволило комплексно оцінити проблему зневоднення фільтрату після сухого анаеробного зброджування органічної фракції ТПВ. На першому етапі було проведено глибокий огляд наукових публікацій і технічної літератури, що стосується формування, складу та методів обробки фільтрату, який утворюється після процесів анаеробного зброджування. Особливу увагу приділено сучасним підходам до механічного зневоднення в умовах підвищеної абразивності осаду [11, 12]. Оцінювалися переваги та недоліки існуючих технологій, зокрема: шнекових, стрічкових і мембранних установок а також можливостей циркуляції фільтрату в технологічному циклі зброджування.

Результати аналітичного етапу стали підґрунтям для вибору обладнання, оптимального з точки зору стійкості та надійності.

На другому етапі було здійснено фізико-хімічний аналіз фільтрату, отриманого після шнекової сепарації дигестату. Дослідження проводились із застосуванням стандартних методик:

- гравіметричний аналіз – визначення загального вмісту сухих речовин (TS) і завислих часток (TSS),
- спектрофотометричні та фотометричні методи – для визначення концентрацій амонійного азоту (NH_4^+), фосфору (P), калію (K),
- визначення хімічного споживання кисню (ХСК) як маркеру органічного забруднення.

Аналіз дозволив охарактеризувати типову структуру фільтрату та ідентифікувати ключові фактори, що ускладнюють його обробку.

Фінальний етап включав пілотне тестування роликового пресу XJD на реальних зразках фільтрату, зібраного після процесу сухого зброджування органіки.

Метою дослідження було:

- оцінити зміну вмісту вологи та сухої речовини після обробки,
- дослідити стабільність роботи обладнання при дії абразивного середовища,
- проаналізувати залишковий вміст завислих речовин і поживних компонентів у фільтраті,
- визначити експлуатаційні характеристики: витрати електроенергії, частоту очищення, роботу приводів.

Результати були задокументовані та використані для оцінки технічної ефективності та економічної доцільності впровадження роликових пресів у системах біологічної переробки відходів.

Викладення основного матеріалу. Польові випробування Роликових пресів серії XJD були проведені на біогазовій станції, що діє при муніципальному сміттєпереробному підприємстві в місті Кельце (Польща).

На цьому підприємстві впроваджено технологічну схему сухого анаеробного зброджування органічної фракції твердих побутових відходів (ТПВ), яка включає наступні основні етапи:

- Механічне сортування ТПВ – відділення органічної фракції від неорганічної (метали, пластик, скло).
- Подрібнення та гомогенізація – забезпечення однорідної структури сировини для ефективнішого перебігу зброджування.
- Завантаження у ферментер – подача маси у герметичний реактор без активного перемішування.
- Ферментація – перебіг анаеробного розкладу в мезофільному або термофільному режимі (температура 37–55 °C).
- Утворення біогазу – під час метаногенезу виділяється біогаз, що складається переважно з метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2).
- Сепарація дигестату – зброжений матеріал подається на шнекові сепаратори, де поділяється на тверду (cake) і рідку (фільтрат) фази.
- Обробка фільтрату – рідка фракція характеризується високою концентрацією органічних домішок, піску та скла. Це обумовлює необхідність подальшого зневоднення перед повторним використанням або утилізацією.

Роликовий прес XJD – це механічна установка безперервної дії, призначений для глибокого зневоднення осадів із попередньою флокуляцією. Пристрій поєднує в собі процеси згущення, перемішування з реагентами та механічного пресування в одному компактному модулі (рис. 1).

Конструктивно прес складається з двох основних блоків. Блок підготовки осаду (на рамі) – включає резервуар з двома відсіками: перший слугує для дозування осаду, другий – для флокуляції. Відділення між ними має V-подібний перелив, який забезпечує стабільне перенаправлення потоку. Усередині флокуляційної камери розташовано мішалку з моторним приводом, що інтенсивно змішує осад із реагентом (флокулянт) до утворення стійких флокул.

Блок зневоднення (розташований над ємністю для збору фільтрату) – приймає флокульований осад із підготовчого блоку та забезпечує механічне зневоднення. Осад транспортується в систему насосом і після хімічної обробки подається в зону зневоднення, де відбувається основний процес видалення води.

Фільтрувальний блок складається з кількох валів, що мають складену конструкцію. Великі й малі тонкі диски з нержавіючої сталі, а також товсті диски зі смоли формують фільтрувальні елементи. Між дисками утворюються щілини, через які проходить лише вода, тоді як флокули затримуються. Сусідні диски постійно переміщуються, що запобігає забрудненню щілин. Фільтрувальні ролики розташовані в двох ярусах – верхньому та нижньому.

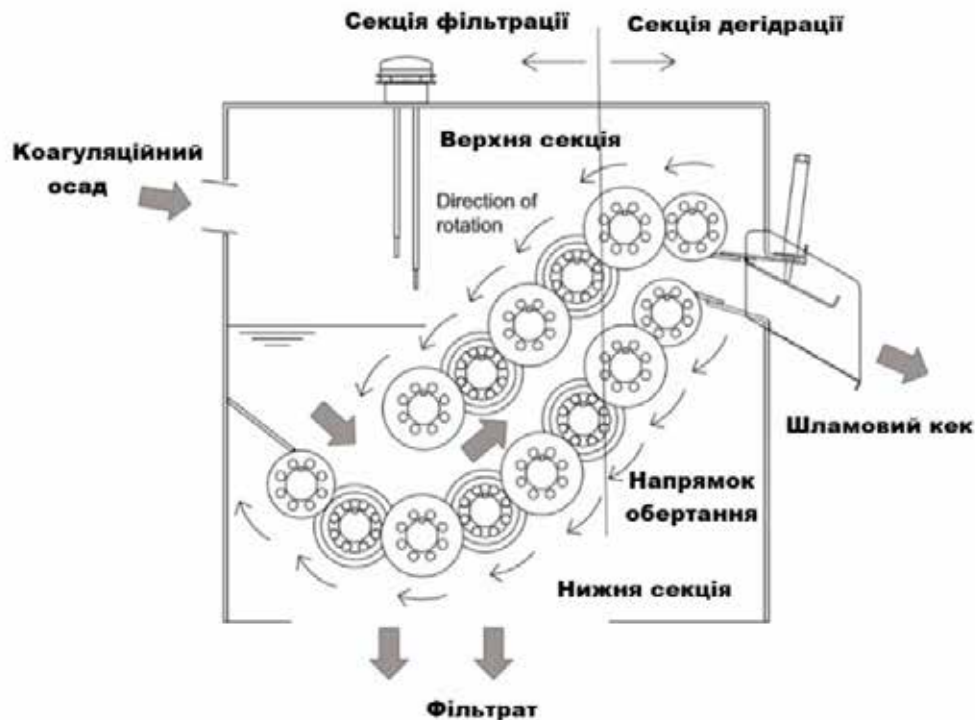


Рис. 1. Схема фільтрувального блоку

Відстань між ярусами поступово зменшується в напрямку до виходу, що забезпечує поетапне стискання осаду. Ролики у зоні зневоднення обертаються повільніше, створюючи умови для додаткового пресування флокульованої маси. На виході зневоднений осад потрапляє в жолоб, оснащений регульованою перегородкою. Ця заслінка створює зворотний тиск, який додатково ущільнює осад і дозволяє регулювати ступінь його зневоднення.

Вміст сухої речовини у вихідному осаді становив від 16,9% до 18,2%, що є доволі високим показником для механічного зневоднення. При цьому вміст легких твердих речовин (VTS) — показник органічної частки осаду за результатами прокалювання при 550 °C — складав від 36,7% до 52,3%, що може свідчати про високу концентрацію біоактивних сполук.

Результати пілотних випробувань продемонстрували високу ефективність роликового дегідратору типу XJD для зневоднення фільтрату після сухого анаеробного зброджування органічної фракції ТПВ. Обладнання стабільно функціонувало в умовах високої абразивності та широкого діапазону концентрацій вхідного осаду (8–13,6%), забезпечуючи вміст сухої речовини у кекі до 35,9%.

Наявність у фільтраті після зневоднення значних залишкових концентрацій речовин свідчить про збереження потенціалу для його подальшого використання. Такий фільтрат може слугувати сировиною для виготовлення мінеральних добрив або технічної води, що відповідає сучасним тенденціям ресайклінгу в рамках циркулярної економіки.

Переваги роликових дегідраторів над традиційними методами (центрифуги, стрічкові преси) проявляються у нижчій енергоємності, підвищеній зносостійкості, відсутності потреби в складному обслуговуванні й високій адаптивності до складних осадів. Це робить обладнання придатним до впровадження на муніципальних і промислових об'єктах біологічної переробки.

Головні висновки. Утворення фільтрату після сухого анаеробного зброджування органічної фракції ТПВ є актуальною технологічною проблемою, яка потребує ефективних рішень з точки зору зневоднення та подальшої утилізації.

Проведені випробування дегідраторів серії XJD продемонстрували їхню здатність ефективно працювати в умовах підвищеної абразивності та при високих навантаженнях. При цьому було досягнуто показників сухої речовини у твердому залишку до 35,9% при концентрації вхідного осаду 8–13,6%.

Перспективи використання результатів дослідження. Впровадження подібного обладнання сприяє побудові замкнених циклів поводження з відходами, зменшує екологічне навантаження та відкриває нові можливості для повторного використання фільтрату.

Подальші дослідження повинні бути зосереджені на оптимізації конструктивних рішень, покращенні змиву та обслуговування агрегатів, а також на вивченні можливостей повторної утилізації очищеного фільтрату як ресурсного компонента.

Таблиця 1

**Результати досліджень фізико-хімічних властивостей
(вміст фосфору, калію, азоту, TSS, TS, ХСК) біомасових відходів**

Показник	Осад / перед пресом	Фільтрат / після преса
P, мг/г	0,158 / 0,093	0,0003 / 0,0001
K, мг/г	1,592 / 1,206	1,073 / 0,722
TSS, %	7,581 / 6,387	0,486 / 0,448
TS, %	3,809 / 3,426	0,220 / 0,200
N, %	0,396 / 0,350	0,219 / 0,204
ХСК, мг/л	92800 / 62336	59050 / 64262

Таблиця 2

Результати вологості фільтрату та кеку після зневоднення

Початковий осад перед пресуванням, %	Осад, %	Фільтрат, %
11,42	25,84	2,35
11,86	27,6	2,14
12,21	31,43	2,26
13,6	29,95	1,9

Література

1. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. Офіційний вісник України. 2017. № 94. Ст. 2859. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
2. Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» / Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>
3. Бузіна І. М., Рябенко В. С. Переробка органічної складової твердих побутових відходів шляхом компостування. Сучасний стан науки в сільському господарстві та природокористуванні: теорія і практика : зб. тез доп. II Міжнар. Наук. Інтернет-конф. м. Тернопіль, 20 листопада 2020 р. Тернопіль : ЗУНУ, 2020. – С. 29-30.
4. Горобець О. В., Галицький В. А. Перспективні напрями утилізації органічних відходів. Наука. Молодь. Екологія – 2016: зб. матеріалів XII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. м. Житомир, 27 травня 2016 р. ЖНАЕУ, 2016. С. 97-102
5. Шумило К. П., Белянська О. Р., Красніков К. С., Мірошніченко Н. В. Дослідження енергоекологічного методу переробки промислово-побутових відходів. Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. 8 (52). – С. 75-80.
6. Утилізація та переробка відходів. Технології, способи, методи переробки відходів. Переробка твердих побутових відходів [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://business-idea.com.ua/ovr0/new-utilizaciya-ipererabotka-otxodov-texnologii-spos-1.html>
7. Perrot, J.-F. Subiantoro, A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. Sustainability 2018, 10, 3114. doi: 10.3390/su10093114
8. Fu, Y. Luo, T. Mei, Z. Li, J. Qiu, K. Ge, Y. Dry Anaerobic Digestion Technologies for Agricultural Straw and Acceptability in China. Sustainability 2018, 10, 4588. doi: 10.3390/su10124588
9. Białecka, B. Waste management in the agri-food industry in the Silesian Voivodeship. Problems of Ecology, 2008. 12(1), 28–32.
10. Dołżyńska, M.; Obidziński, S.; Kowczyk-Sadowy, M.; Krasowska, M. Densification and Combustion of Cherry Stones. Energies 2019, 12, 3042. doi: 10.3390/en12163042
11. Carraro G, Tonderski K, Enrich-Prast A. Solid-liquid separation of digestate from biogas plants: A systematic review of the techniques performance. J Environ Manage. 2024. 356:120585. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120585
12. Nowak, M. Czekala, W. Sustainable Use of Digestate from Biogas Plants: Separation of Raw Digestate and Liquid Fraction Processing. Sustainability 2024, 16, 5461. doi: 10.3390/su16135461

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025