

РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ОБРОБКИ АНАЕРОБНО ЗБРОДЖЕНОГО ОСАДУ (ДИГЕСТАТУ) СТИЧНИХ ВОД ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Андрій Шевченко¹, Олексій Мясоєдов², Тамара Шевченко³

¹ LPP S.A., 39/44, вул. Łąkowa, Gdańsk, Poland, 80-769, Республіка Польща

² Esmil Process Systems Ltd., 30 Abbey Barn Road, High Wycombe, England, UK, HP10 9TN, Велика Британія

³ Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова
17, вулиця Маршала Бажанова, Харків, 61002, Україна

¹ канд. техн. наук, andrii.a.shevchenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9576-282X

² M.Sc. in Chemistry, miaso.keo@gmail.com, orcid.org/0000-0001-6630-0952

³ канд. техн. наук, tamara.shevchenko@kname.edu.ua, orcid.org/0000-0002-4513-6759

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.100-109

Анотація. Питання зневоднення та утилізації осадів стічних вод є одним з актуальних через гостру нестачу земельних ресурсів, негативне екологічне навантаження на водні ресурси, ґрунти та атмосферу цих осадів у разі їх накопичення без належної обробки. Анаеробна стабілізація осадів стічних вод харчового виробництва – один з найбільш розповсюджених методів обробки вказаного типу осадку через можливість отримання важливого енергоресурсу – біогазу. Отриманий після анаеробної стабілізації у метантенках осад називається дигестатом, і він також потребує обробки та подальшої утилізації. Дигестат у разі дотримання санітарно-гігієнічних вимог може бути використаний у вигляді добрива. Розробка технологічної схеми обробки дигестату стічних вод є складним питанням, яке не має одного правильного рішення. На основі проведених експериментальних досліджень запропонований гібридний технологічний процес обробки дигестату стічних вод харчової промисловості, який включає зневоднення анаеробно стабілізованого осадку на мультидисковому дегідраторі із застосуванням розбавлення самого осадку через його значну в'язкість, додавання коагулянту та флокулянту. Кек з вологістю близько 65–80% може бути транспортований та використаний у вигляді добрива для сільського господарства. Відокремлений фільтрат від дигестату за технологічною схемою пропонується очищати на двох ступенях мембран. Ефективність очищення рідкої фракції дигестату на двоступеневій мембранній установці за двома варіантами показала наступні результати: варіант 1 (VSEP + RO) – 95%, варіант 2 (ZI + RO1 + RO2) – 94%. У системі VSEP використовується герметична RO мембрана, тому двопрхідний мембранний процес (VSEP+RO) підходить для досягнення кінцевої мети (отриманий пермеат можливо повторно використовувати), тоді як у разі застосування ZI-мембрани необхідний трипрхідний мембранний процес для досягнення тієї ж мети. Досягнуті параметри дозволяють використовувати отриманий пермеат для виробничих потреб підприємства чи в самій технологічній схемі обробки дигестату для розведення осадку або для приготування розчинів реагентів. Отримані продукти (кек та концентрати після мембран) можна використовувати у вигляді добрив.

Ключові слова: кондиціонування осадку, зневоднення осадку, дигестат, ультрафільтрація, зворотний осмос, добриво.

© Шевченко А., Мясоєдов О.,
Шевченко Т., 2023

ВСТУП

Актуальним питанням у галузі очистки промислових стічних вод є питання обробки та утилізації осадів, які утворюються на очисних станціях в результаті процесів очищення. Найбільш розповсюдженим методом очистки стічних вод сьогодні є біологічний метод, який передбачає використання активного мулу у технологічному процесі. Під час перебігу процесу біологічного очищення стічних вод утворюється надлишковий активний мул, який потребує обробки та подальшої утилізації [1–2].

Стосовно осадів стічних вод, які утворюються на харчових виробництвах, можна виділити високий вміст органічних забруднень, значний вміст сполук азоту та фосфору в таких осадах. Однією з найбільш розповсюджених технологій мінералізації осадів стічних вод харчового виробництва є застосування метантенків. Тобто осад піддається анаеробному зброджуванню, в результаті якого отримується два продукти: біогаз та стабілізований осад або дигестат. Дигестат осадів стічних вод за хімічним складом близький до компосту і може мати такий вміст хімічних сполук: азот – 2,3–4,2 кг/т, фосфор – 0,2–1,5 кг/т, калій – 1,3–5,2 кг/т [3–5].

Основними фізико-хімічними показниками біомаси, яка подається на анаеробне зброджування у метантенки, є: вологість, вміст сухої речовини, вміст органічної сухої речовини, кислотність (рН), вміст білків, вуглеводів та жирів. На процес зброджування осадів впливають: температура, вологість середовища, рівень рН, співвідношення С:N:P, площа поверхні частинок сировини, частота подачі субстрату, уповільнюючі речовини, стимулюючі добавки. Від цих показників залежить час зброджування, кількість одержуваного біогазу та його склад і властивості майбутнього біодобрива – дигестату [5].

Накопичення дигестату на території очисних споруд призводять до забруднення атмосфери, підземних та поверхневих водних джерел, ґрунтів тощо. Тому важливим є питання подальшої обробки та утилізації його у вигляді товарного продукту [6–7].

Зазвичай дигестат у процесі обробки (зневоднення) поділяється на тверду та рідку фракції. Тверда фракція вологістю 70–90% може транспортуватися у насипному вигляді або у вигляді палет і у подальшому може бути використана у якості добрива для сільськогосподарських територій, але тільки за умови санітарно-гігієнічної безпеки отриманого продукту [8–9].

В свою чергу, рідка фракція дигестату також потребує подальшої обробки з метою повторного використання [10–12]. Відокремлена рідина має значні значення ХПК, БПК, концентрації азоту та фосфору, тому так само, як й тверда фракція дигестату, може бути використана у вигляді добрива. Обробка отриманого після зневоднення фільтрату може проходити із застосуванням різних технологій, які дозволяють розділити рідку фракцію дигестату на пермеат та концентрат. Пермеат може бути використаний для технологічних потреб виробництва, а концентрат, багатий на поживні органічні сполуки, може бути використаний для виробництва добрив [13–15].

Проте розробка технологічної схеми обробки фільтрату дигестату стічних вод є складним питанням, яке не має одного правильного рішення. Техніко-економічний підхід до питання підготовки рідкої фракції дигестату має включати питання щодо доцільності застосування тих чи інших технологій з урахуванням подальшої реалізації отриманих продуктів (пермеату та концентрату). Визначення основних техно-логічних споруд та технологій, які будуть приймати участь в очистці рідкої фракції є одним з найважливіших питань у галузі обробки та утилізації осадів стічних вод промисловості, зокрема і харчової [16–18].

Широко поширеними для очистки рідкої фракції дигестату є мембранні технології, які зазвичай включають декілька ступенів фільтрації, а саме: ультрафільтрацію та нанофільтрацію [19–20].

Отже наша робота була спрямована на розробку гібридного технологічного процесу обробки дигестату стічних вод харчової промисловості з метою отримання товарного продукту у вигляді добрива та очи-

щеної води, яка може бути повторно використана.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою роботи була оцінка ефективності зневоднення дигестату та подальшої мембранної очистки рідкої фракції дигестату.

Задачі, які були вирішені під час проведення досліджень, були такими:

– дослідити процес зневоднення дигестату стічних вод харчової промисловості із використанням багатодискового шнекового зневоднювача ESMIL MDQ [21];

– порівняти ефективність роботи двох типів ультрафільтраційних мембран (VSEP-мембран та ZI-мембран) при очистці рідкої фракції дигестату;

– визначити ефективність роботи зворотноосмотичних RO-мембран на другому ступені очистки рідкої фракції дигестату та можливість повторного використання отриманого пермеату.

Об'єкт досліджень

Об'єктом дослідження був анаеробно зброжений осад (дигестат) стічних вод харчового виробництва.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Для проведення досліджень була використана пілотна установка. Випробування пілотного обладнання проводилися на заводі ReCon Waste Management (Північна Ірландія).

Було відібрано проби дигестатів стічних вод харчового виробництва. Вихідний дигестат мав наступні характеристики:

- рН = 7,72;
- вміст сухої речовини – 4,07%;
- вміст розчинених твердих речовин – 3,26%;
- вміст завислих речовин – 0,81%;
- дигестат характеризувався підвищеною в'язкістю.

Перед початком випробувань дигестат пройшов етап механічної підготовки для видалення грубих домішок (волокон, соломи тощо) з метою забезпечення нормальної експлуатації обладнання та насосів пілотної установки.

В роботі запропонований гібридний технологічний процес обробки дигестату стічних вод харчового виробництва, який поєднує методи фізико-хімічного концентрування та розділення рідкої і твердої фракцій, механічного зневоднення твердої фракції та двохетапного мембранного очищення рідкої фракції (фільтрату) (рис. 1).

Залежно від потреб процес може включати лише частину етапів усього процесу та бути індивідуально прийнятим для конкретного об'єкта.

Відповідно до процесу анаеробний дигестат подається у хімічний реактор, в який додаються розчини коагулянту та флокулянту. Осад флокулюється і подається для розділення твердої та рідкої фракції на багатодисковому шнековому зневоднювачі ESMIL MDQ (рис. 2). У процесі кондиціонування використовується трубчастий флокулятор із комбінацією різних статичних змішувачів (діафрагм), клапанів, входів і датчиків. У трубах флокулятора встановлені діафрагми, які створюють турбулентні потоки, необхідні для забезпечення відповідної енергії перемішування та ефективного розділення твердої фази колоїдного розчину. У якості коагулянту був застосований хлорид заліза (III) $FeCl_3$, а у якості флокулянту застосовували розчин поліакриламід (ПАА).

Для зниження в'язкості осаду і забезпечення високої ефективності процесу, осад закачували у флокулятор і розбавляли потоком свіжої або оборотної води (фільтратом) у співвідношенні 1:1.

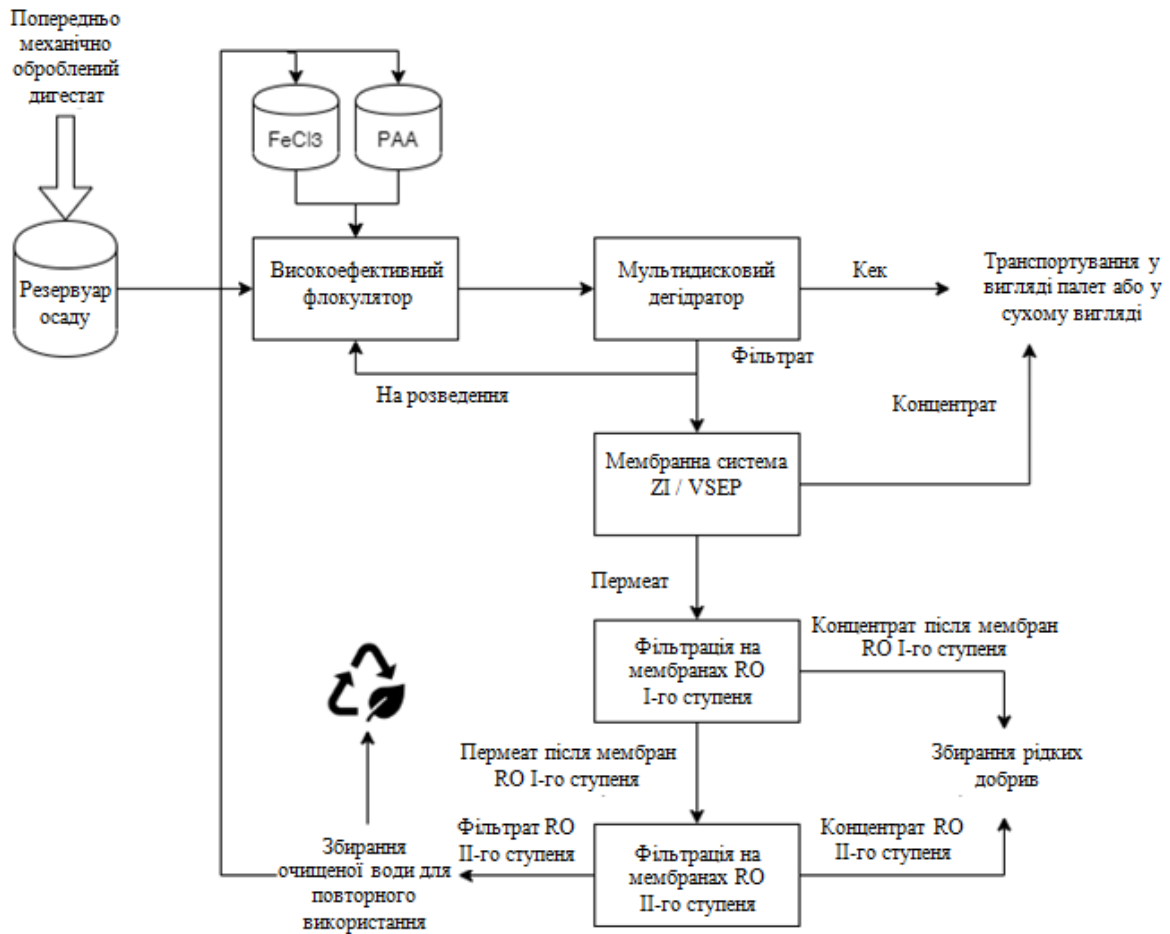


Рис. 1. Схема гібридного технологічного процесу обробки дигестату стічних вод харчового виробництва

Fig. 1. Schematic of the hybrid technological process of treatment wastewater digestate of food production

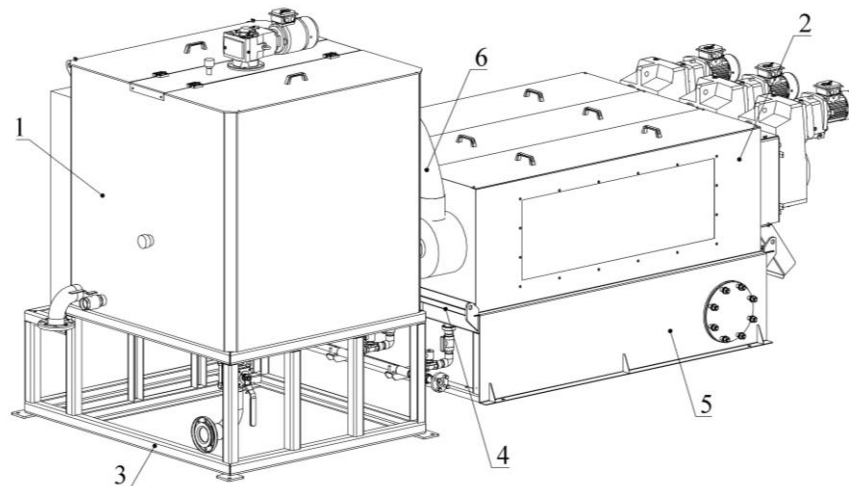


Рис. 2. Основні компоненти багатодискового шнекового зневоднювача MDQ: 1 – змішувальний бак; 2 – зневоднювальний барабан(и); 3 – рама-основа камери флокуляції; 4 рама зневоднювальних барабанів; 5 – піддон для збору фільтрату; 6 – живильна труба зневоднювального барабана

Fig. 2. Main components of multi-disc screw dewaterer MDQ: 1 – Mixing tank; 2 – Dewatering drum(-s); 3 – Frame-base of the flocculation chamber; 4 Dewatering drums skid frame; 5 – Filtrate collection tray; 6 – Dewatering drum feed tube

Після етапу зневоднення були отримані такі характеристики зневодненого осаду:

- вміст сухої речовини у кеці (відокремлена тверда фракція) – 14,7%;
- вміст завислих речовин у фільтраті (рідка фракція) – 1,5 г/л;
- доза флокулянту ПАА склала 14,9 кг/т сухої речовини;
- доза коагулянту FeCl₃ – 270 мг/л;
- продуктивність зневоднювача – 16,1 кг сух. реч./год.

В табл. 1 наведені результати досліджень після етапу зневоднення дигестату.

Табл. 1. Результати досліджень зневоднення дигестату на багатодисковому шнековому зневоднювачі MDQ

Table 1. Results of digestate dewatering studies on MDQ multi-disc screw dehydrator

Показник	Значення параметру	
	у вихідному дигестаті	після етапу зневоднення
Вміст сухої речовини у вихідному осаді, %	4,07	14,7
Доза коагулянту, мг/л	–	270
Доза ПАА, кг/т сух. реч.	–	14,9
Вологість осаду, %	95,93	85,3
Вміст завислих речовин у фільтраті, г/л	–	1,5
Продуктивність зневоднювача, кг сух.реч./год.	16,1	

Отриманий кек може бути перероблений у палети, транспортований та використаний як добриво.

Для видалення грубих твердих частинок осаду перед кондиціонуванням можна застосовувати різні типи грохотів, такі як гвинтові преси, вібраційні грохоти тощо. В якості альтернативи можна застосувати багатодисковий прес з роликівим типом, який поєднує процеси просіювання та зневоднення. Технологія багатодискового зневоднення, запропонована у нашій роботі, на

сьогоднішній день є найефективнішою з точки зору споживання енергії, води та хімікатів, експлуатації та обслуговування, а також ефективності зневоднення. Вказана технологія демонструє набагато кращі результати порівняно з центрифужними декантерами щодо експлуатаційних витрат, витрат на технічне обслуговування, робочої сили та надійності процесу. Альтернативи хімічному кондиціонуванню такого складного мулу наразі не знайдено.

Відокремлена рідка фракція направляється на наступний етап очищення – двоступеневу мембранну очистку.

Під час досліджень першим етапом мембранної очистки було вивчено ефективність ультрафільтраційних мембран: VSEP-мембран та ZI-мембран.

Наступним ступенем очистки були зворотноосмотичні RO-мембрани. Під час досліджень розглядалися наступні варіанти застосування мембранної очистки фільтрату:

1) фільтрат обробляють через мембрани VSEP + RO.

2) фільтрат обробляють через мембрани ZI + RO1 + RO2;

Мембрани VSEP (Vibratory Shear Enhanced Processing) – це високоефективні, стійкі до забивань вібруючі мембрани. Наявність завислих речовин у фільтраті після етапу зневоднення водночас із розчиненими речовинами може призвести до серйозних проблем у роботі стандартних мембранних систем, оскільки їх пори дуже чутливі до забивання. Однак технологія VSEP заснована на використанні вібруючих мембран, які біля своєї поверхні створюють високоінтенсивний поперечний потік, що значно зменшує ризик забивання останніх [22]. Цвіттеріонні мембрани (ZI-мембрани) менш стійкі до забруднення, ніж технологія VSEP, але вони мають високі гідрофільні властивості, що дозволяє застосовувати їх для помірно забруднених рідин.

За варіантом 1 фільтрат після етапу зневоднення надходив на ультрафільтраційні VSEP-мембрани, а далі на очистку одним ступенем зворотноосмотичних RO-мембран.

За другим варіантом 2 після ZI-мембран отриманий пермеат направлявся на двоступеневу очистку на RO-мембранах для досягнення вимог до якості пермеату, який можна повторно використовувати у технологічному процесі або у виробництві.

Під час досліджень були отримані результати, представлені в табл. 2.

Табл. 2. Результати двоступеневої мембранної очистки фільтрату після етапу зневоднення дигестату

Table 2. Results of the two-stage membrane filtration of the filtrate after the digestate dehydration stage

Варіант мембранної очистки		Параметри		
		Тиск, бар	Ефективність, %	Робочий потік, л/м за год.
Варіант 1	VSEP	35	78	21
	RO	25	95	38
Варіант 2	ZI	5	95	7,4
	RO1	35	86	17
	RO2	30	94	35

На рис. 3 представлені результати експериментальних досліджень щодо якісних показників фільтрату після кожного етапу очистки за варіантом 1.

Результати експериментальних досліджень щодо якісних показників фільтрату після кожного етапу очистки за варіантом 2 показані на рис. 4.

Згідно даних табл. 2 та рис. 3–4 ефективність роботи мембран, робочі параметри були такими, як очікувалося. У системі VSEP використовується герметична RO мембрана, тому двопрхідний мембранний процес (VSEP+RO) підходить для досягнення кінцевої мети, тоді як у разі застосування ZI-мембрани, яка є відносно відкритою мембраною та в основному призначена для видалення твердих речовин і органіки з високою молекулярною масою, необхідний трипрхідний мембранний процес для досягнення тієї ж мети. Друга стадія RO після ZI+RO показала 94% ефективності очистки за варіантом 2.

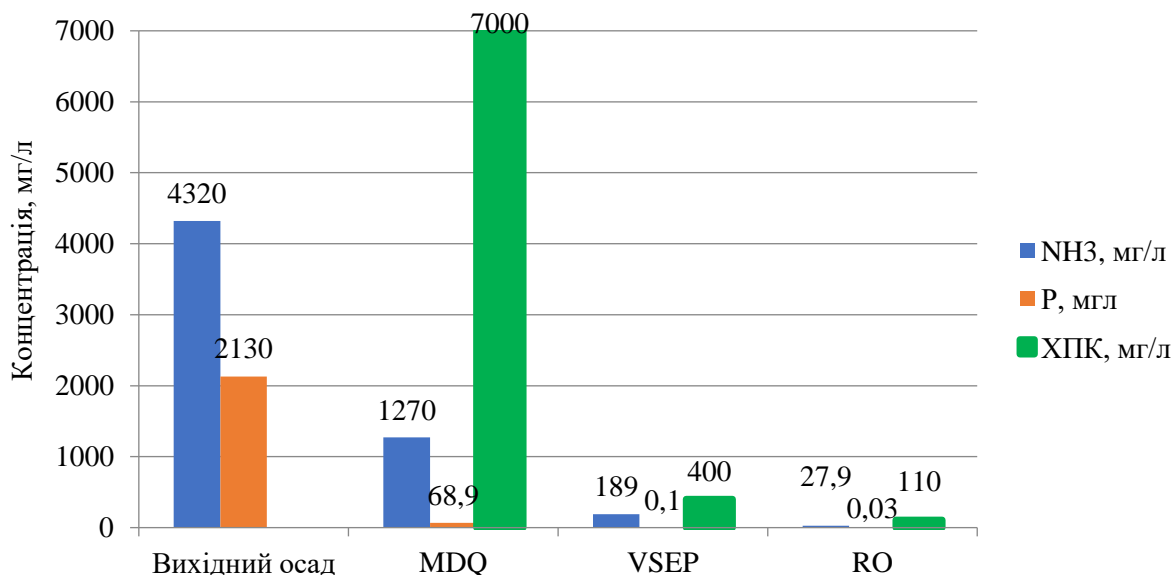


Рис. 3. Динаміка зміни концентрацій ХПК, амонійного азоту та фосфатів за технологічною схемою очистки фільтрату за варіантом 1

Fig. 3. Dynamics of changes in concentrations of COD, ammonium nitrogen and phosphates according to the technological scheme of leachate purification according to variant 1

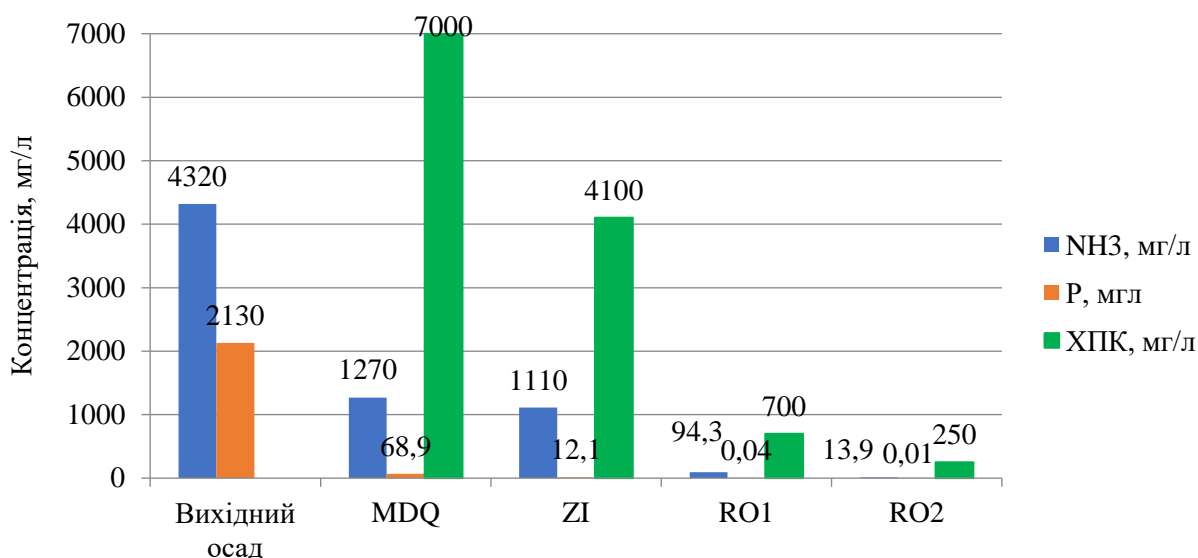


Рис. 4. Динаміка зміни концентрацій ХПК, амонійного азоту та фосфатів за технологічною схемою очистки фільтрату за варіантом 2

Fig. 4. Dynamics of changes in concentrations of COD, ammonium nitrogen and phosphates according to the technological scheme of leachate purification according to variant 2

Запропонована вібраційна мембранна система (VSEP) підходить для обробки потоків з більшою кількістю завислих твердих речовин, ніж звичайні мембранні технології, які часто забиваються.

Цвіттеріонні мембрани (ZI) менш стійкі до забруднення, ніж технологія VSEP, але їх високі гідрофільні властивості дозволяють використовувати їх для помірно забруднених рідин.

Загальне гідравлічне відновлення для обох варіантів мембрани майже однакове. VSEP, як запатентована технологія, впливає на вартість, але є надійним процесом для роботи з високим вмістом твердих речовин у фільтраті, що надходить на ультрафільтраційну мембранну очистку.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі проведених досліджень зроблено наступні висновки:

- в результаті зневоднення дигестату стічних вод харчової промисловості із використанням багатодискового шнекового зневоднювача ESMIL MDQ був отриманий кек з вмістом сухої речовини 14,7 %, що дозволило зменшити обсяг осаду та надало можливість транспортувати отриманий кек для подальшого використання у вигляді добрива;

- для інтенсифікації процесу зневоднення запропоновано кондиціонування осаду з додаванням коагулянту хлориду заліза (III) та флокулянту ПАА, дигестат стічних вод харчового виробництва перед зневодненням потребує розведення очищеним фільтратом або технічною водою через значну в'язкість у співвідношенні 1:1;

- ефективність очищення рідкої фракції дигестату на двоступеневій мембранній установці за двома варіантами показало наступні результати: варіант 1 (VSEP + RO) – 95%, варіант 2 (ZI + RO1 + RO2) – 94%;

- у системі VSEP використовується герметична RO мембрана, тому двопрхідний мембранний процес (VSEP+RO) підходить для досягнення кінцевої мети (отриманий пермеат можливо повторно використовувати), тоді як у разі застосування ZI-мембрани необхідний трипрхідний мембранний процес для досягнення тієї ж мети.

ЛІТЕРАТУРА

1. Петрук В. Г., Северин Л. І., Васильківський І. В., Безвозюк І. І. Природоохоронні технології. Навчальний посібник. Ч.2 : Методи очищення стічних вод. Вінниця, ВНТУ, 2014. 258 с.
2. Семенова О. І., Омельченко Є. О., Тогачинська О. В., Котинський А. В.

Очищення стічних вод харчових підприємств // Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Recent Scientific Investigation» (July 26–28, 2023). Oslo, Norway. № 164. p. 183–190.

3. **Степова О. В., Трохименко Г. Г.** Навчально-методичний посібник «Технології захисту водного середовища». Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 2022. – 306 с.

4. **Паламарчук В. Д., Кричковський В. Ю.** Ефективність використання дигестату при вирощуванні моркви та буряків столових // Корми і кормовиробництво. 2020. Вип. 90. С. 68–82.

5. **Kulichkova G.** Comparative characteristics of native (liquid) and concentrated up to 40 % vinasse as a raw material for anaerobic fermentation // EUREKA: Life Sciences, 2022, 6, 25–35.

6. **Паламарчук В. Д., Кричковський В. Ю., Рудська Н. О., Колісник О. М.** Новітні технології вирощування овочевих культур та кукурудзи за використання дигестату біогазових станцій: монографія. Вінниця: Друкарня «Друк», 2023. 296 с.

7. **Кучерук П.** Органічне добриво як ланка рециклінгу поживних речовин // Платформа сталого агробізнесу «SAF Україна». 20 березня 2020 р.

8. **Токарчук Д. М., Пришляк Н. В., Паламаренко Я. В.** Стратегія поводження з відходами аграрних підприємств: раціональне поводження з відходами рослинництва, відходами тканин тварин, тваринним гноєм, агрохімічними відходами // Ефективна економіка. № 12, 2021.

9. **Albini E., Pecorini I., Ferrara G.** Improvement of Digestate Stability Using Dark Fermentation and Anaerobic Digestion Processes // Energies. 2019. 12(18). P. 3552.

10. **Cerda A., Mejias L., Rodríguez P., Rodríguez A., Artola A., Font X., Gea T., Sánchez A.** Valorization of digestate from biowaste through solid-state fermentation to obtain value added bioproducts: A first approach // Bioresource Technology. Vol. 271, 2019, P. 409–416.

11. **Brtnicky M., Kintl A., Holatko J. et al.** Effect of digestates derived from the fermentation of maize-legume intercropped culture and maize monoculture application on soil properties and plant biomass production // Chem. Biol. Technol. Agric. 9, 43 (2022).

12. **Świąteczak P., Cydzik-Kwiatkowska A.** Treatment of Ammonium-Rich Digestate from Methane Fermentation Using Aerobic Granular Sludge // Water Air Soil Pollut. 229, 247 (2018).

13. **Tsaridou C., Karanasiou A., Plakas K.V., Karabelas A.J.** Valorization of Anaerobic-Fermentation Liquid Digestates-Membrane-Based Process Development // Membranes (Basel). 2023 Mar 1; 13(3). P. 297.

14. **Kuroda K., Nishikawa R.** Effect of Digestate from Methane Fermentation using *Ulva* sp. and Food Waste for Cultivation of Decolored *Pyropia yezoensis* (Edible Laver Seaweed) // European Journal of Sustainable Development Research. (2020). 4(4), em0128.

15. **Weckerle T., Ewald H., Guth P., Knorr K.H., Philipp B., Holert J.** Biogas digestate as a sustainable phytosterol source for biotechnological cascade valorization // Current Trends in Waste Valorization. Vol. 6, Issue 2, 2022.

16. **Bühlmann C. H., Mickan B. S., Tait S., Batstone D. J., Bahri P. A.** Lactic Acid Production From Food Waste at an Anaerobic Digestion Biorefinery: Effect of Digestate Recirculation and Sucrose Supplementation // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. Vol. 11. 2023.

17. **Urbanowska A., Polowczyk I., Kabsch-Korbutowicz M.** Treatment of Liquid Fraction of Digestate by Integrated Process Struvite Precipitation – Forward Osmosis // Energies. 2023; 16(1):47.

18. **Chuda A., Ziemiński K.** Ultrafiltration of Digestate Liquid Fraction by Hollow-Fiber Membranes: Influence of Digestate Pre-Treatment on Hydraulic Capacity and Nutrient Removal Efficiency // Chemical Engineering Journal. Vol. 473, 2023. 145426.

19. **Beggio G., Peng W., Lü F., Cerasaro A., Bonato T., Pivato A.** Chemically Enhanced Solid–Liquid Separation of Digestate: Suspended Solids Removal and Effects on Environmental Quality of Separated Fractions // Waste and Biomass Valorization. 2022. 13(2).

20. **Tambone F., Orzi V., D'Imporzano G., Adani F.** Solid and Liquid Fractionation of Digestate: Mass Balance, Chemical Characterization, and Agronomic and Environmental Value // Bioresource Technology. Vol. 243, 2017. P. 1251–1256.

21. **Мультидисковий шнековий зневоднювач MDQ/MDC.** URL: <https://ua.esmil.eu/product/multi-disc-screw-press/>, дата звернення: 01.11.2023.

22. **Обробка інфільтрату з полігонів ТПВ.** URL: <https://ua.esmil.eu/wp->

[content/uploads/2020/03/esmil_leachate_treatment_ua.pdf](#), дата звернення: 01.11.2023.

REFERENCES

1. Petruk, V. G., Severyn, L. I., Vasykivskiy I. V., Bezvoziuk I. I. (2014). *Environmental protection technologies. Tutorial. Part 2: Wastewater treatment methods*. Vinnytsia, VNTU. Retrieved from <http://surl.li/nhkno>. [in Ukrainian]
2. Semenova, O. I., Omelchenko, E. O., Togachynska, O. V., & Kotynskiy, A. V. (2023). Wastewater treatment of food enterprises. *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference "Recent Scientific Investigation"*. Oslo, Norway, 164. 183–190. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/download/4144/4181>. [in Ukrainian]
3. Stepova, O. V., & Trokhymenko, H. G. (2022). *Technologies for the protection of the aquatic environment*. Educational and methodological manual. Poltava: Poltava Polytechnic University named after Yury Kondratyuk, Mykolaiv: Admiral Makarov National Shipbuilding University. Retrieved from <http://surl.li/mrtdx>. [in Ukrainian]
4. Palamarchuk, V. D., & Krychkovsky, V. Yu. (2020). The efficiency of using digestate in the cultivation of carrots and table beets. *Fodder and fodder production*, 90, 68-82. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobny-tstvo202090-06>
5. Kulichkova, G. (2022). Comparative characteristics of native (liquid) and concentrated up to 40 % vinasse as a raw material for anaerobic fermentation. *EUREKA: Life Sciences*, 6, 25-35. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2022.002692>.
6. Palamarchuk, V. D., Krychkovskiy, V. Yu., Rudska, N. O., & Kolisnyk, O. M. (2023). *Latest technologies for growing vegetable crops and corn using biogas plant digestate: monograph*. Vinnytsia. Retrieved from <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/33725.pdf>. [in Ukrainian]
7. Kucheruk, P. (2020). Organic fertilizer as a link of nutrient recycling. *Sustainable agribusiness platform "SAF Ukraine"*. Retrieved from <https://saf.org.ua/news/902/> [in Ukrainian]
8. Tokarchuk, D. M., Pryshlyak, N. V., & Palamarenko, Y. V. (2021). Waste management strategy of agricultural enterprises: rational management of crop production waste, animal tissue waste, animal manure, agrochemical waste. *Efficient economy*, 12. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.12.104>
9. Albini, E., Pecorini, I., & Ferrara, G. (2019). Improvement of Digestate Stability Using Dark Fermentation and Anaerobic Digestion Processes. *Energies*, 12(18), 3552. <https://doi.org/10.3390/en12183552>.
10. Cerda, A., Mejias, L., Rodríguez, P., Rodríguez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., & Sánchez A. (2019). Valorization of digestate from biowaste through solid-state fermentation to obtain value added bioproducts: A first approach. *Biore-source Technology*, 271, 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.131>.
11. Brtnicky, M., Kintl, A., Holatko, J., Hammerschmiedt, T., Mustafa, A., Kucerik, J., Vitez, T., Prichystalova, J., Baltazar, T., & Elbl, J. (2022). EFFECT of digestates derived from the fermentation of maize-legume intercropped culture and maize monoculture application on soil properties and plant biomass production. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00310-6>.
12. Świątczak, P., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2018). Treatment of Ammonium-Rich Digestate from Methane Fermentation Using Aerobic Granular Sludge. *Water Air Soil Pollut.*, 229, 247. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3887-x>.
13. Tsaridou, C., Karanasiou, A., Plakas, K.V., & Karabelas, A. J. (2023). Valorization of Anaerobic-Fermentation Liquid Digestates-Membrane-Based Process Development. *Membranes (Basel)*, 13(3), 297. <https://doi.org/10.3390/membranes13030297>
14. Kuroda, K., & Nishikawa, R. (2020). Effect of Digestate from Methane Fermentation using Ulva sp. and Food Waste for Cultivation of Decolored Pyropia yezoensis (Edible Laver Seaweed). *European Journal of Sustainable Development Research*, 4(4), em0128. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/8209>.
15. Weckerle, T., Ewald, H., Guth, P., Knorr, K.H., Philipp, B., & Holert, J. (2022). Biogas digestate as a sustainable phytosterol source for biotechnological cascade valorization. *Microbial Biotechnology*, 16(2), 337–349. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14174>
16. Bühlmann, C. H., Mickan, B. S., Tait, S., Batstone, D. J., & Bahri, P. A. (2023). Lactic Acid Production From Food Waste at an Anaerobic Digestion Biorefinery: Effect of Digestate Recirculation and Sucrose Supplementation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1177739>
17. Urbanowska, A., Polowczyk, I., & Kabsch-Korbutowicz, M. (2023). Treatment of Liquid Fraction of Digestate by Integrated Process Struvite

Precipitation – Forward Osmosis. *Energies*. 16(1). <https://doi.org/10.3390/en16010047>.

18. Chuda, A., & Ziemiński, K. (2023). Ultrafiltration of Digestate Liquid Fraction by Hollow-Fiber Membranes: Influence of Digestate Pre-Treatment on Hydraulic Capacity and Nutrient Removal Efficiency. *Chemical Engineering Journal*. 473. 145426. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145426>.

19. Beggio, G., Peng, W., Lü, F., Cerasaro, A., Bonato, T., & Pivato, A. (2022). Chemically Enhanced Solid–Liquid Separation of Digestate: Suspended Solids Removal and Effects on Environmental Quality of Separated Fractions. *Waste and Biomass Valorization*. 13(2). 1029-1041. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01591-y>

20. Tambone, F., Orzi, V., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2017). Solid and Liquid Fractionation of Digestate: Mass Balance, Chemical Characterization, and Agronomic and Environmental Value. *Bioresour. Technol.* 243. 1251-1256. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.130>.

21. MDQ/MDC multi-disc screw dehydrator. Retrieved from <https://ua.esmil.eu/product/multi-disc-screw-press/>, access date: 11/01/2023.

22. Treatment of leachate from solid waste landfills. Retrieved from https://ua.esmil.eu/wp-content/uploads/2020/03/esmil_leachate_treatment_ua.pdf, access date: 11/01/2023.

Development of a Hybrid Technological Scheme for the Treatment of Anaerobically Fermented Sludge (Digestat) of Wastewater of the Food Industry

Andrii Shevchenko, Oleksii Miasoiedov, Tamara Shevchenko

Abstract. The issue of dewatering and disposal of sewage sludge is one of the most urgent due to the acute shortage of land resources, the negative ecological burden on water resources, soils and the atmosphere of these sludges in case of their accumulation without proper treatment. Anaerobic stabilization of food production wastewater sludge is one of the most widespread methods of processing this type of sludge due to the possibility of obtaining an important energy resource – biogas. The sludge obtained after anaerobic stabilization in methane tanks is called digestate, and it also needs treatment and further disposal. Digestate can be used as a fertilizer if sanitary and hygienic requirements are met. The development of a technological scheme for processing wastewater digestate is a complex issue that does not have one correct solution. A hybrid technological process for processing wastewater digestate of the food industry is proposed on the basis of experimental studies. Experimental studies include dewatering anaerobically stabilized sludge on a multi-disc dehydrator using dilution of the sludge itself due to its significant viscosity, addition of coagulant and flocculant. Cake with a moisture content of about 65–80% can be transported and used as fertilizer for agriculture. The separated filtrate from the digestate according to the technological scheme is proposed to be purified on two stages of membranes. The efficiency of cleaning the liquid fraction of the digestate on a two-stage membrane installation according to two variants showed the following results: variant 1 (VSEP + RO) – 95%, variant 2 (ZI + RO1 + RO2) – 94%. The VSEP system uses a hermetic RO membrane, so a two-pass membrane process (VSEP+RO) is suitable to achieve the end goal (permeate obtained can be reused), while a ZI membrane requires a three-pass membrane process to achieve the same goal. The achieved parameters make it possible to use the obtained permeate for the production needs of the enterprise or in the technological scheme of the digestate processing itself for dilution of the sediment or for the preparation of reagent solutions. The resulting products (cake and concentrates after membranes) can be used as fertilizers.

Key words: sludge conditioning, sludge dehydration, digestate, ultrafiltration, reverse osmosis, fertilizer.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2023