

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
**Факультет технічних систем та енергоефективних технологій**  
**Кафедра екології та природозахисних технологій**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Леонід ПЛЯЦУК  
(підпис)

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня бакалавр**  
зі спеціальності 101 «Екологія» освітньо-професійної програми  
«Екологія та охорона навколишнього середовища»  
на тему:

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ЯКІСТЬ АНАЕРОБНОГО**  
**ДИГЕСТАТУ НА ОСНОВІ СИРОВИНИ РІЗНОГО ГЕНЕЗИСУ**

Здобувачки групи ОС-01 Лисицької Анни Володимирівни

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Анна ЛИСИЦЬКА  
(підпис)

Керівник – доцент кафедри екології  
та природозахисних технологій,  
доктор технічних наук, доцент

\_\_\_\_\_ Ірина АБЛЄЄВА  
(підпис)

**Суми – 2024**

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра екології та природозахисних технологій  
Спеціальність 101 «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студентові Лисицькій Анні Володимирівні

Група ОС-01

1. Тема кваліфікаційної роботи: Екологічна безпека та якість анаеробного дигестату на основі сировини різного генезису.
2. Вихідні дані: БД Scopus та WoS для пошуку статей за темою роботи, стандарти якості для добрив України та ЄС, нормативи вмісту ЗР у ґрунті.
3. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:
  1. Відповідність складу дигестату стандартам якості та екологічної безпеки ґрунту.
  2. Систематизація забруднювальних речовин у дигестаті залежно від виду сировини.
  3. Візуалізація рекомендацій щодо застосування додаткових методів для деградації забруднювальних речовин у дигестаті

4. Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

№	Етапи і розділи проектування	ТИЖНІ					
		1	2	3	4	5	6
1	Літературний огляд	+	+				
2	Аналіз проблеми			+			
3	Оброблення результатів				+		
4	Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях					+	
5	Оформлення роботи						+

Дата видачі завдання 3.04.2024 р.

Керівник \_\_\_\_\_

Доцент кафедри екології та природозахисних технологій, д.т.н., доцент Аблесва І. Ю.

## АНОТАЦІЯ

*Структура та обсяг випускної кваліфікаційної роботи бакалавра.* Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання, який містить 65 найменування. Загальний обсяг бакалаврської роботи становить 54 сторінки, у тому числі 4 таблиці, 11 рисунків, перелік джерел посилання на 8 сторінках.

*Мета роботи* – встановити закономірності та фактори, що визначають якість та екологічну безпеку дигестату. Для досягнення зазначеної мети було поставлено та виконано такі *завдання*: провести аналіз літературних джерел; систематизувати забруднювальні речовини у дигестаті залежно від виду сировини; дослідити методи деградації забруднювальних речовин у дигестаті; проаналізувати ефективність трансформації окремих груп забруднювальних речовин під час анаеробного зброджування сировини різного генезису; розробити рекомендації щодо застосування додаткових методів для деградації забруднювальних речовин у дигестаті.

*Об'єкт дослідження* – використання анаеробного дигестату із сировини різного походження як перспективного біодобрива та альтернативи мінеральним добривам.

*Предмет дослідження* – закономірності деградації забруднювальних речовин для підвищення екологічної безпеки анаеробного дигестату як біодобрива.

У кваліфікаційній роботі надана характеристика поняттю дигестат, його екологічної безпечності та якості анаеробного дигестату на основі сировини різного генезису. Розглянуто та проаналізовано використання анаеробного дигестату із сировини різного походження. Наведені та обґрунтовані об'єкти та методика дослідження.

*Ключові слова:* АНАЕРОБНИЙ ДИГЕСТАТ, ДЕГРАДАЦІЯ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ЗАБРУДНЮВАЛЬНІ РЕЧОВИНИ, СИРОВИНА.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ДОСЛІДЖУВАНОЮ ТЕМАТИКОЮ ...	7
1.1 Аналіз практики застосування анаеробного дигестату як біодобрива в Україні та закордоном .....	7
1.2 Екологічні аспекти заміни мінеральних добрив на дигестат .....	11
1.3 Аналіз екологічної безпеки дигестату відповідного до чинних стандартів якості.....	14
1.4 Постановка завдань дослідження .....	17
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДЕГРАДАЦІЇ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У ДИГЕСТАТІ.....	19
2.1 Систематизація забруднювальних речовин у дигестаті залежно від виду сировини.....	19
2.2 Аналіз ефективності деградації забруднювальних речовин під час анаеробного зброджування з урахуванням температурного режиму .....	21
2.3 Вплив додаткових факторів на ефективність розкладання полютантів у дигестаті .....	24
РОЗДІЛ 3 ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕГРАДАЦІЇ ОКРЕМИХ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У ДИГЕСТАТІ РІЗНОГО ГЕНЕЗИСУ .....	27
3.1 Руйнування фармацевтичних препаратів та засобів особистої гігієни, що містяться в осадах стічних вод.....	27
3.2 Трансформація стійких органічних забруднювачів на прикладі пестицидів, що містяться у сільськогосподарській сировині.....	34
3.3 Рекомендації щодо застосування додаткових методів для деградації забруднювальних речовин у дигестаті.....	37
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	40
4.1 Техніка безпеки під час роботи у біогазовій лабораторії .....	40
4.2 Розрахунок штучної вентиляції для лабораторії з урахуванням специфіки запахів.....	43
ВИСНОВКИ.....	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	47

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№покл.	

ОС 20510093

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		Літ.	Аркуш	Аркушів
		Лисицька			Екологічна безпека та якість анаеробного дигестату на основі сировини різного генезису			
		Аблєєва					4	54
		Батальцев				СумДУ, ф-т ТеСЕТ гр. ОС-01		
		Пляцук						

## ВСТУП

Актуальність теми. Біогазові технології визнані ефективними та перспективними методами не лише в аспекті виробництва біогазу, але й з метою одержання екологічно безпечного біодобрива з дигестату. Використання анаеробного дигестату як біодобрива стає дедалі актуальнішим через його потенціал для вирішення кількох важливих екологічних проблем. Анаеробний дигестат є побічним продуктом процесу анаеробного зброджування, під час якого відбувається перетворення органічних речовин в біогаз, відновлюване джерело енергії. Анаеробний дигестат багатий такими поживними речовинами, як азот (N), фосфор (P) і калій (K), що робить його цінним біодобривом для сільськогосподарського застосування. Внесення дигестату може стимулювати мікробіологічну активність та покращити родючість ґрунту завдяки надходженню поживних органічних речовин в ґрунт. На додаток до вмісту поживних речовин, анаеробний дигестат може також покращити структуру ґрунту та утримання води, зменшити потенціал ерозії ґрунту, що може призвести до збільшення росту рослин та їх врожайності.

Актуальним є питання вмісту забруднювальних речовин у дигестаті, оскільки сировиною для анаеробного зброджування виступають різні види відходів. Ступінь деградації поллютантів у процесі анаеробного зброджування варіюється залежно від різних факторів. Основними серед яких є вид субстрату, операційні та режимні параметри процесу, що протікають у біореакторі, а також застосування додаткових технологій оброблення сировини та дигестату. Саме ці аспекти і представляють науковий інтерес та актуальність роботи для підвищення екологічної безпеки дигестату як біодобрива, оскільки заміна мінеральних добрив на дигестат може сприяти крім того, продовольчій безпеці та пом'якшенню наслідків зміни клімату.

Мета роботи – встановити закономірності та фактори, що визначають якість та екологічну безпеку дигестату.

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ОС 20510093

Арк

5

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

Завдання роботи:

- провести аналіз літературних джерел з питань:
  - 1) застосування анаеробного дигестату як біодобрива в Україні та закордоном;
  - 2) екологічні аспекти заміни мінеральних добрив на дигестат;
  - 3) екологічна безпека дигестату відповідно до чинних стандартів якості;
- систематизувати забруднювальні речовини у дигестаті залежно від виду сировини;
- дослідити методи деградації забруднювальних речовин у дигестаті;
- проаналізувати ефективність трансформації окремих груп забруднювальних речовин під час анаеробного зброджування сировини різного генезису;
- розробити рекомендації щодо застосування додаткових методів для деградації забруднювальних речовин у дигестаті.

Об’єкт дослідження – використання анаеробного дигестату із сировини різного походження як перспективного біодобрива та альтернативи мінеральним добривам.

Предмет дослідження – закономірності деградації забруднювальних речовин для підвищення екологічної безпеки анаеробного дигестату як біодобрива.

Методи дослідження. Основну інформаційну базу для виконання роботи склали наукові праці закордонних та вітчизняних вчених, звіти, онлайн інструменти наукової бази даних Scopus, матеріали науково-практичних конференцій, правових та нормативних актів України.

Результати дослідження у межах кваліфікаційної роботи апробовано на XI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві», м. Суми, 23-26 квітня 2024 р., з публікацією тез на тему «Зв’язування важких металів під час анаеробного зброджування».

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

										ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата							6

# РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ДОСЛІДЖУВАНОЮ ТЕМАТИКОЮ

## 1.1 Аналіз практики застосування анаеробного дигестату як біодобрива в Україні та закордоном

Дигестат – це побічний продукт, що залишається після анаеробного зброджування (розкладання в умовах низького вмісту кисню) органічної сировини. В результаті анаеробного зброджування утворюються два основні продукти: дигестат і біогаз (рис 1.1). Дигестат утворюється як в результаті ацидогенезу, так і метаногенезу, і кожен з них має різні характеристики [1]. Ці характеристики залежать від вихідної сировини, а також від самих процесів.

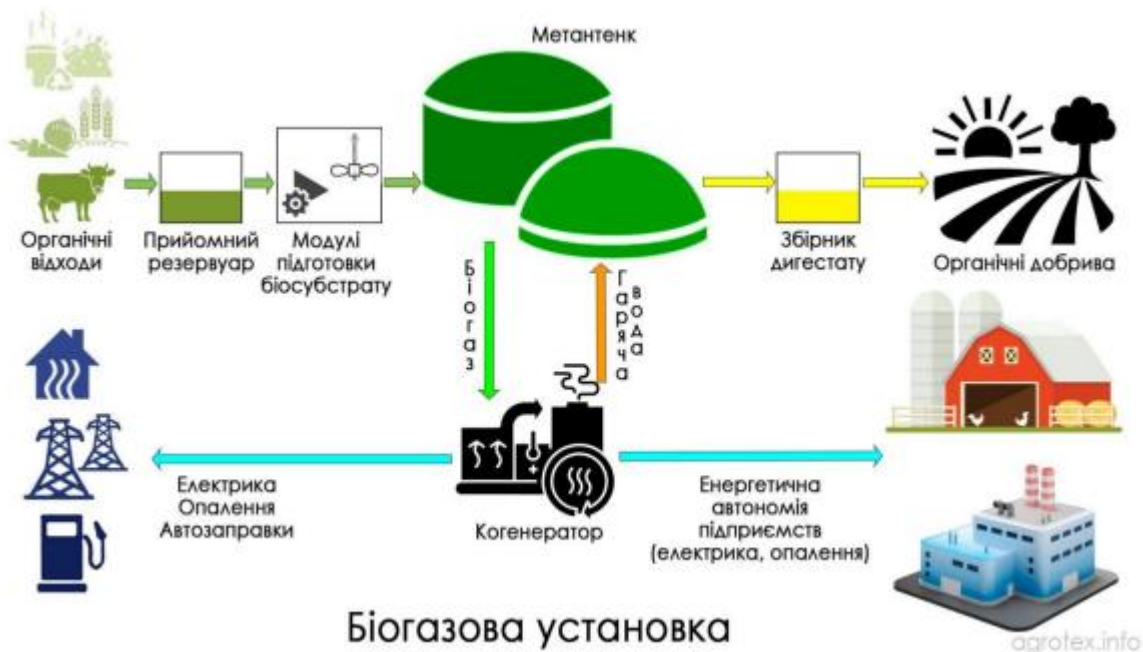


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення утворення дигестату

Технологія отримання біогазу та переробки органічних відходів шляхом анаеробного зброджування успішно застосовується в ряді країн та здатна значно покращити економічні, екологічні та соціальні аспекти сталого розвитку. В ході процесу анаеробного зброджування в основному акцентується увага виключно на виробництві біогазу як основного продукту. Тим не менш, утворюється

Підп. і дата							
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.						
Взаєм.інв.№							
Підп. і дата							
Інв.№подл.							
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	ОС 20510093		Арк
							7

еффлоент, який являє собою рідкий матеріал з твердими частинками в суспензії, з хіміко-фізичними та агрономічними характеристиками, що відповідають добриву.

Процес анаеробного зброджування, по суті, призводить до зменшення органічної речовини, але не зменшує кількість азоту та фосфору, в той час як мінералізує частину органічного азоту в аміачний азот, роблячи його доступним для рослин. Однією з обов'язкових умов від якого залежить якість ефекту – це температурний режим зброджування біомаси. При підвищеній температурі нейтралізуються патогенні мікроорганізми та неприємний запах, гине насіння бур'янів і т.д., у зв'язку з чим можна вважати, що термофільне зброджування є найбільш оптимальним [3].

У дослідженнях Qi G., Pan Z., Sugawa Y. Та ін. проведено порівняння властивостей дигестатів з гною великої рогатої худоби (ВРХ), отриманих в умовах мезофільного та термофільного зброджувань, при більш позитивному впливі термофільних умов [16], особлива увага приділялася бактеріям, які стимулюють зростання рослин. Встановлено, що властивості еффлоента залежать від вихідної сировини та умов анаеробної зброджування. Використання дигестату має позитивний ефект для рослин, оскільки містить органічні речовини та поживні елементи, що дозволяє замінити синтетичні добрива.

Сировиною для анаеробного зброджування можуть бути різні органічні відходи: сільськогосподарські відходи, відходи від тварин та боєнь, побутові харчові відходи, відходи харчової промисловості, осади стічних вод. Хімічний склад утвореного дигестату змінюється залежно сировини. Осад стічних вод і гній тварин, як правило, містять більшу частину енергії, яка споживається через те, що первинне джерело енергії (їжа) спочатку перетравлюється в організмі людини або тварини. Це дозволяє цим субстратам бути хорошими кандидатами для спільного зброджування разом з іншою сировиною для отримання більш якісного дигестату для сільськогосподарських цілей, а також для збільшення виробництва біогазу [4].

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

						ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			8



У разі використання сировини, що утворена тільки із стічних вод тваринництва, азот перебуває переважно в аміачній формі [9]. Деякі дослідження підкреслюють, як рН культури сильно впливає на розчинність фосфору та мікроелементів; дійсно, підвищення рН зрушує хімічний баланс у бік утворення фосфату ( $\text{HPO}_4^{2-} \rightarrow \text{PO}_4^{3-}$ ), а потім його осадження у вигляді фосфату кальцію або магнію (наприклад,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ). Зміни фосфору також можуть залежати від форми зв'язування інших елементів, таких як залізо.

Крім того, мінералізація магнію, фосфору та азоту у поєднанні з підвищеним рН культури може призвести до утворення та кристалізації фосфату магнію амонію (гідрат фосфату  $\text{Mg}$  e  $\text{NH}_4^+$ ). Проведені у багатьох дослідженнях [10-14] експерименти, показують що якість можливих добрив ефлluentів залежить від великого різноманіття вихідної сировини, що застосовується для виробництва біогазу, де вміст азоту значно відрізнявся [15].

Рідка фракція становить до 90% дигестату за об'ємом, містить 2-6% сухої речовини, частинки розміром 1,2 мм і більшу частину розчинного азоту та калію, тоді як тверда фракція утримує більшу частину фосфору дигестату і містить суху речовину > 15% [6]. Численні дослідження показали, що дигестат може давати аналогічні або вищі врожаї різних культур порівняно зі стандартними методами вирощування, що використовуються в гідропоніці та вирощуванні безґрунтових субстратів [7].

Дигестат є цінним ресурсом для відновлення родючості ґрунтів, оскільки містить різноманітні поживні речовини та мікроелементи у формі, доступній для ґрунтової біоти, сприяє зміні рН та зволоженню ґрунту, а також є джерелом корисних для ґрунту бактерій. Найбільш раціональним використанням дигестату є його внесення в ґрунт [8].

Згідно з українським законодавством (Згідно Закону України "Про пестициди та агрохімікати") [65], дигестат, що утворюється в біогазових установках – це залишки сировини, побічних продуктів та відходів тваринного або рослинного походження, в суміші або ні, що утворюються в результаті

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата	

ОС 20510093

контрольованого процесу анаеробного зброджування з виділенням біогазу, що відповідає вимогам, встановленим Регламентом (ЄС) 2019/1009 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року про встановлення правил розміщення на ринку добрив ЄС та вносить зміни до Регламентів (ЄС) 1069/2009 та (ЄС) 1107/2009 та про скасування Регламенту (ЄС) 2003/2003. На дигестат, що використовується як органічне добриво чи покращувач ґрунту, не поширюються вимоги щодо проведення державної реєстрації пестицидів і агрохімікатів. Натомість він повинен відповідати стандартам якості для добрив.

Переваги використання анаеробного дигестату включають у себе збагачення ґрунту поживними речовинами, покращення його структури, зменшення ерозії та зниження потреби у мінеральних добривах. Деякі успішні приклади використання дигестату в Україні можна знайти у фермерських господарствах, таких як агрофірма "П'ятихатська" (Дніпропетровська область), ТОВ "Біогаз Енерджі" (Хмельницька область) та ТОВ "Агросем" (Київська область) [18].

У світі застосування анаеробного дигестату як біодобрива є досить поширеним явищем. Це стало можливим завдяки наявності чіткої нормативної бази, яка регулює використання дигестату в сільському господарстві. Фермери у багатьох країнах активно використовують дигестат як альтернативу мінеральним добривам. Переваги використання анаеробного дигестату за кордоном аналогічні тим, що і в Україні. Це включає у себе покращення ґрунтової структури, збагачення ґрунту поживними речовинами та зменшення ерозії.

Деякі приклади країн, де анаеробний дигестат широко використовується як біодобриво, включають у себе Німеччину, Францію, Швецію та США [19]. Оглянувши практику використання анаеробного дигестату як біодобрива в Україні та за кордоном, можна визначити, що наразі його застосування в Україні має потенціал для просунення на ринку у зв'язку із змінами в нормативній базі. У світі ж цей вид біодобрива має широке використання завдяки наявності регулюючих документів та впевненості фермерів у його ефективності.

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ОС 20510093

Арк

Підвищення обізнаності фермерських господарств про переваги дигестату можуть сприяти розширенню його застосування в Україні.

## 1.2 Екологічні аспекти заміни мінеральних добрив на дигестат

Мінеральні добрива, які використовуються в сільському господарстві, можуть мати деякі екологічні недоліки, зокрема:

- 1) надмірне застосування мінеральних добрив може призвести до надмірного вмісту елементів в ґрунті, що є токсичним для рослин й інших організмів;
- 2) мінеральні добрива можуть сприяти зростанню однієї культури або виду, що може призвести до зменшення біорізноманіття та здоров'я екосистеми;
- 3) деякі мінеральні добрива, такі як добрива на основі амонію, можуть знизити рН ґрунту, що може бути шкідливим для деяких рослин і мікроорганізмів;
- 4) виробництво та транспортування мінеральних добрив призводить до викиду парникових газів, таких як CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>O, які сприяють зміні клімату;
- 5) багаторазове внесення мінеральних добрив може змінити фізичну структуру ґрунту, зробивши його більш схильним до ерозії та менш здатним підтримувати ріст рослин.

Сьогодні в світі все більше звертають увагу на екологічні аспекти сільськогосподарського виробництва. Однією з важливих альтернатив мінеральним добривам є анаеробний дигестат.

Екологічні переваги дигестату, як добрива:

1. Використання дигестату дозволяє зменшити кількість органічних відходів, які викидаються на полігони для сміття або піддаються іншим видам обробки, що часто супроводжується викидами шкідливих газів у атмосферу.

2. Дигестат містить поживні речовини, які допомагають зберігати та покращувати родючість ґрунту, уникати його виснаження та зберігати водні ресурси.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ОС 20510093

Арк

11

3. Застосування дигестату сприяє зменшенню виведення азотних сполук у водні джерела, що допомагає у запобіганні еутрофікації та забрудненню водних ресурсів.

4. Використання дигестату допомагає зберегти природне біорізноманіття, оскільки не вимагає зрізання лісів або забір земельних угідь під видобуток сировини для виробництва мінеральних добрив.

Якість дигестату як органічного добрива визначається чотирма основними групами показників: поживним складом, фазовим станом, стабільністю та вмістом шкідливих домішок (рис. 1.2).

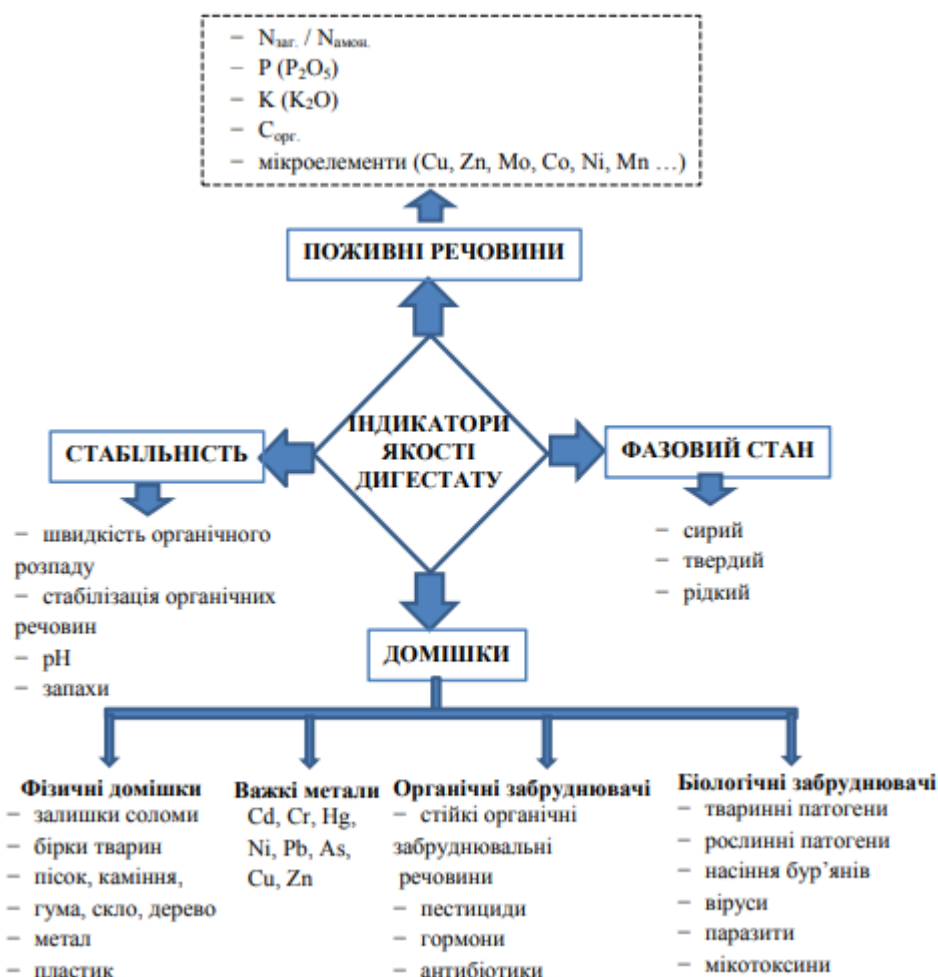


Рисунок 1.2 – Показники якості дигестату

Вміст поживних речовин, гумінових речовин та мікроелементів у дигестаті визначає його ефективність як добрива, а отже, і його потенційну ринкову

Інв. №подл.	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

вартість. Надмірний вміст певних видів домішок знижує його комерційну цінність, обмежує сферу застосування або робить його непридатним для використання без додаткової обробки.

Вміст вологи та щільність продуктів з дигестату мають значний вплив на витрати на транспортування та польове застосування. Нарешті, ступінь стабільності впливає на зручність і безпеку використання та торгівлі. Виробництво та використання дигестату як добрива вимагає управління якістю та контролю протягом усього виробничого циклу, від виробництва сировини до використання дигестату як добрива.

У процесі використання дигестату як добрива, він діє подібно до мінеральних добрив, оскільки його елементи, такі як азот (N), фосфор (P) і калій (K), легко доступні для рослин. Окрім того, частка органічної речовини у дигестаті позитивно впливає на властивості ґрунту, а вміст мінеральних елементів сприяє росту культур. Для збереження і оптимального використання дигестату, можуть використовуватися різні технології, такі як сепарація, концентрування, сушіння.

Застосування добрива на основі дигестату покращує родючість ґрунту, підвищує врожайність культур, знижує кислотність ґрунту і сприяє захисту рослин від несприятливих умов навколишнього середовища. Для досягнення максимального екологічного ефекту необхідно правильно вносити дигестат в ґрунт, щоб уникнути забруднення ґрунтових та водних ресурсів.

Зростання температур та зменшення опадів, які спостерігаються внаслідок глобального потепління та зміни клімату, призводять до деградації ґрунтів в Україні. Це явище, що включає ерозію, забруднення, підкислення та засолення, негативно впливає на родючість ґрунтів та врожайність сільськогосподарських культур. Екологічні аспекти заміни мінеральних добрив на дигестат виявляють значний потенціал для збереження довкілля та покращення стану ґрунтів. Однак, для досягнення позитивного екологічного впливу необхідно враховувати технологічні особливості внесення та контролю якості дигестату відповідно до стандартів якості добрива.

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

						ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			13

### 1.3 Аналіз екологічної безпеки дигестату відповідного до чинних стандартів якості

Для гарантування рівня якості виготовлюваної продукції та захисту інтересів споживачів розроблена та прийнята система сертифікації продукції, яка полягає у засвідченні відповідності її заданим вимогам згідно положень державних стандартів України та обов'язкових нормативних документів, міжнародних та національних стандартів інших держав, які чинні в Україні.

В Україні, екологічна безпека дигестату, як добрива, регулюється наступними нормативними документами:

- Державний стандарт України (ДСТУ) 7735:2014 "Добрива органічні. Методи визначення якості" Цей стандарт встановлює методи визначення фізико-хімічних показників дигестату, таких як суха речовина, рН, вміст азоту, фосфору, калію, важких металів та інших забруднюючих речовин.

- Санітарні норми для виробництва та використання добрив в Україні (Санітарні правила ДП "Державний науково-дослідний інститут лабораторної діагностики та ветеринарно-санітарної експертизи" МОЗ України від 22.05.2014 р. № 6) Ці норми встановлюють допустимі рівні вмісту патогенних мікроорганізмів, гельмінтів та інших шкідливих домішок у дигестаті.

- Правила застосування добрив та пестицидів в Україні (Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 15.11.2012 р. № 645) Ці правила встановлюють норми внесення дигестату в ґрунт, а також вимоги до його зберігання та транспортування.

Важливо зазначити, що перед використанням дигестату як добрива, необхідно провести його лабораторний аналіз на відповідність вищезазначеним стандартам. Ключовими факторами для оцінки якості дигестату під час його використання у сільському господарстві є рівень рН, наявність поживних речовин, загальна кількість твердих речовин (ЗТР), летючі речовини (ЛР) та загальний вміст вуглецю (ЗВ). Ця якість залежить від початкових матеріалів та

Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Підп. і дата	Інв.№подл.
	Інв.№дубл.		

ОС 20510093

Арк

типу системи анаеробного розкладання. Зазвичай вміст амоніаку у дигестаті становить близько 60-80% від загального вмісту азоту, хоча для таких матеріалів, як харчові відходи, цей показник може сягати 99%. Крім того, дослідження [28] свідчить про вищу концентрацію фосфору та калію у дигестаті порівняно з компостом, приблизно в співвідношенні фосфор:калій 1:3. Усі ці аспекти роблять дигестат потенційно цінним джерелом для додавання у ґрунт для сільськогосподарських культур [29].

Стандарт якості дигестату, що утворюється під час анаеробного розкладання, можна оцінювати за трьома критеріями: хімічним, біологічним і фізичним аспектами. Хімічна якість включає в себе вміст важких металів, інших неорганічних забруднювачів, стійких органічних сполук і кількість макроелементів, таких як азот, фосфор і калій. В залежності від джерела початкових матеріалів, біовідходи можуть містити патогенні мікроорганізми, які потребують належного управління, щоб уникнути поширення хвороб серед людей, тварин або рослин. Фізичні стандарти дигестату включають в себе зовнішній вигляд та аромат. Належний контроль якості початкових матеріалів є ключовим для забезпечення якості кінцевого продукту [30]. В декількох країнах-членах Європейського Союзу вже розроблені стандарти та технічні вимоги для дигестату.

У Німеччині, система гарантії якості для дигестату використовується за допомогою "GüteGemeinschaft Gärprodukt e.V.", що спеціалізується у підтвердженні якості установок анаеробного зброджування. Вони є членами "Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V." (BGK), Федеральної асоціації якості компосту. Крім того, у Бельгії, Швеції та Сполученому Королівстві діє добровільна система гарантії якості для дигестату. У кожній з цих систем якість контролюється через перевірку відповідності національним нормативам, які включають у себе перелік компонентів початкової сировини, предмети добрив, та правила моніторингу та контролю процесу з метою дотримання гігієнічних вимог.

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

ОС 20510093

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

15

Цей контроль включає вимірювання температури та рівня рН у реакторі, забезпечення санітарно-гігієнічних умов, визначення часу гідравлічного утримання, та оцінку навантаження за органічними речовинами та обсягом. Всі речовини та добавки повинні мати документальне підтвердження, а також застосовуватися заходи для запобігання порушення технологічного режиму через повторне забруднення. Початкова сировина повинна бути чистою та розділеною вже на джерелі її утворення. Контроль функціонування здійснюється через відвідування установки незалежними менеджерами служби забезпечення якості. Продукти регулярно перевіряються незалежними пробовідбірниками (від 4 до 12 разів на рік) і супроводжуються офіційними аналітичними звітами. Також надаються рекомендації щодо правильного використання відповідно до регламентів, що стосуються використання добрив.

У Сполученому Королівстві, дигестат може отримувати статус припинення стану відходів, що визначено Протоколом якості дигестату, впровадженим з вересня 2009 року, розробленим WRAP (Програма дій у галузі відходів і ресурсів) та Агентством довкілля. Цей протокол застосовний у Англії, Уельсі та Північній Ірландії, встановлюючи критерії припинення статусу відходів для якості кінцевої продукції, отриманої у процесі анаеробного зброджування біорозкладних відходів, розділених в джерелі утворення, із виключенням осаду стічних вод. Гної дозволяється як вихідний матеріал [31].

Для відповідності матеріалу Протоколу якості, виробники дигестату повинні мати сертифікат відповідності схемі сертифікації BSI PAS110, керованій Агентством навколишнього середовища. У Швеції, існує добровільна система сертифікації для анаеробного зброджування, SPCR120. Ця система гарантує якість як самого процесу, так і кінцевого продукту – дигестату. Однак, згідно з SPCR 152 QAS, дигестат, який відповідає сертифікату якості SPCR 120, все ще має статус відходів. Початкові матеріали для сертифікованого дигестату повинні бути чистими, розділеними та біорозкладними, при цьому осади стічних вод виключені, але гній є припустимим.

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

					ОС 20510093		Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			16



У Німеччині, сертифікат Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) виступає як показник якості для компосту, дигестату та осадів стічних вод. BGK є визнаним органом моніторингу та контролю якості в Німеччині, управляючи RAL GZ 245 для продуктів анаеробного зброджування з біовідходів та RAL GZ 246 для продуктів зброджування з енергетичних культур. Схема RAL GZ 245 є добровільною, але може надати установкам певні пільги згідно з місцевими законодавчими вимогами.

Ця процедура надає дигестату з гарантованою якістю "квазі" статус продукту в Німеччині. Як і вироблений з біовідходів, так і дигестат із енергетичних культур, підлягають дозволу як для рідких, так і для твердих форм продукції. Дозвіл на використання сертифіката якості RAL для дигестату надається відповідно до стандартів якості та перевірки, сформульованих у методичних настановах BGK для аналізу органічних добрив, структуроутворювачів ґрунту та поживного субстрату. Збір проб та проведення досліджень повинні здійснюватися схваленим зовнішнім органом моніторингу [32].

Проблема вмісту забруднювальних речовин у дигестаті є актуальною та важливою з екологічної точки зору.

#### 1.4 Постановка завдань дослідження

Анаеробний дигестат, продукт розкладання органічних відходів на біогазових станціях, може бути цінним добривом для ґрунту. Проте, його екологічна безпека залежить від вмісту забруднювальних речовин.

Перший аспект, що варто розглянути, - це походження забруднювальних речовин у дигестаті. Оскільки це добриво формується внаслідок розкладання органічних матеріалів, до складу дигестату можуть потрапляти різноманітні забруднювачі, такі як токсичні метали, хімічні сполуки з пестицидів та добрив, мікроорганізми, які можуть викликати захворювання тощо.

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

						ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			17

Ці забруднювальні речовини можуть мати значний вплив на якість дигестату як добрива та на екологічний стан ґрунту, в який він вноситься. Тому, важливо ретельно досліджувати склад дигестату та вживати заходів для зменшення вмісту забруднювачів у ньому.

Другий аспект, на який варто звернути увагу, - це аналіз сучасного стану досліджень у галузі вмісту забруднювальних речовин у дигестаті. Різні дослідження та експерименти дозволяють нам отримати більш детальне уявлення про те, які саме забруднювачі можуть зустрічатися у цьому типі добрива і який вплив вони можуть мати.

Останній аспект, який варто розглянути, - це шляхи вирішення проблеми вмісту забруднювальних речовин у дигестаті. Сучасні технології та методи дозволяють зменшити рівень забруднення добрив та підвищити їх безпечність та ефективність. Наприклад, застосування фільтраційних систем та методів очищення може допомогти видалити забруднювачі з дигестату. Також важливо вживати заходів на етапі збору вихідних матеріалів для процесу розкладання, щоб уникнути потрапляння забруднювачів у добриво.

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата	ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата		18

## РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДЕГРАДАЦІЇ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У ДИГЕСТАТІ

### 2.1 Систематизація забруднювальних речовин у дигестаті залежно від виду сировини

Субстрати, що використовуються для виробництва біогазу та утворені з відходів різного генезису, містять певні забруднювальні речовини, що надходять до сировини природним та антропогенним шляхами. У результаті застосування хімічних засобів захисту рослин та мінеральних добрив лігноцелюозна маса може містити пестициди, важкі метали, радіонукліди. Також під час вирощування, транспортування, переробки та іншої сільськогосподарської діяльності часто використовуються плівки, ткани мішки, сітчасті покриття і деякі пластикові труби та пластини, частина яких може залишатися у сільськогосподарських відходах, як показано в нещодавньому огляді авторів [20].

У дослідженні [21] встановлено, що харчові відходи містять важкі метали, патогени та органічні мікрозабруднювачі, до яких відносять хімічні речовини, такі як ліки та пестициди, що використовуються в даний час і це викликає занепокоєння. Осади стічних вод є найбільш забрудненою сировиною для анаеробного зброджування серед інших видів субстрату [22]. Водночас, цей вид субстрату найчастіше використовується сумісно з іншими видами органічного субстрату тваринного чи рослинного походження з метою збалансування хімічного складу сировини та створення сприятливих умов для метаболізму бактерій. Найбільш токсичними є персистентні органічні забруднювачі, які мають високий ризик для здоров'я людей [23]. Однак, забруднювальні речовини підлягають деградації у процесі анаеробного зброджування, що повністю або частково попереджує їх перехід до дигестату (табл. 2.1).

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дага	
Інв.№подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ОС 20510093

Арк

19

Таблиця 2.1 – Характеристика забруднювальних речовин у сировині для анаеробного зброджування різного генезису

Вид субстрату (сировини для анаеробного зброджування)	Забруднювальні речовини	Наявність у дигестаті (так/ні)	Посилання на джерело літератури
Тваринні відходи	Фенантрен Леткі жирні кислоти, антрахінон-2-сульфонат Антибіотики Тилозин	ні так так (10%) так (10%)	[20]
Осади стічних вод	Органічні речовини від нановолокон тітанату Поліциклічні ароматичні вуглеводні, поліхлоровані біфеніли, хлорорганічні пестициди; Фенольні та жирні сполуки від оливи Мікропластик, важкі метали, антибіотики та стійкі органічні сполуки Алкілфеноли, фталати, поліциклічні ароматичні вуглеводні, фармацевтичні відходи, гормони, перфлоровані кислоти, лінійні алкілбензолсульфонати і поліхлорбіфеніли 2,4,6-трихлорофенол Поліхлоровані біфеніли (ПХБ) і хлорорганічні пестициди Хінолін, фенол, атехол, резорцинол, гідрохінон Амоксицилін Октокрилен Бензо[а]пірен Мікропластик Мікропластик (ди(2-етилгексил)фталат і фталат)	так так ні ні ні ні так ні ні так ні ні ні ні так ні ні ні	[21]
Рослинні відходи	Хлорфенол Флорфенікол Гексахлорбензен, гумінова кислота Мікропластик (ди(2-етилгексил)фталат і фталат)	так так так ні	[22]
Харчові відходи	PLA-пластик Мікропластик (ди(2-етилгексил)фталат і фталат)	так так так	[23]

Залежно від типу сировини існує певна специфіка щодо вмісту різних забруднювальних речовин у дигестаті. Наприклад, у суміші тваринних і рослинних відходів, що представляє собою гній сільськогосподарських тварин поряд з різними рослинними залишками, можуть міститися пестициди на прикладі гідрохлордеконів і поліхлороінденів, амфіциліну і різних жирних кислот

та спиртів [28]. Натомість рослинні відходи окремо, що представлені в основному лігноцелюлозною біомасою, у якості головних забруднювачів містять мікробну біомасу й антибіотики на прикладі флорфеніколу, тоді як тваринні відходи, що представлені такою речовиною, як фенантрен, містять консорціум різних мікроорганізмів, а ті самі відходи на основі муніципальних твердих залишків містять фенол і бісфенол А [29]. Осад стічних вод, що може бути представленим нановолокнами титанату, містить у своєму складі комплекс різних органічних речовин, тоді як осад стічних вод на основі мікропластикових частинок містить такі забруднювальні речовини, як, наприклад, важкі метали й антибіотики, а той самий осад на основі мулу – алкілфеноли, фталати, поліциклічні ароматичні вуглеводні та ін. [30].

Зміна значень показника рН у відходах дигестату пов'язана з перетворенням органічних сполук та визначається балансом органічних кислот, аміаку, вуглекислоти. Рідка фракція (фугат) містить менше 10% сухої речовини та основної кількості калію. Азот у фугаті міститься переважно в амонійній формі (до 80% від масової частки загального азоту). Фугат із харчових рослинних відходів містив у 6 разів більше загального азоту, у 3,2 рази більше фосфору та 2,9 рази більше калію в порівнянні з вихідною сировиною. Утилізація органічних відходів методом анаеробного зброджування дозволяє виключити стічні води тваринницьких комплексів з категорії небезпечних та отримати вторинну сировину у вигляді рідкого органічного добрива.

## 2.2 Аналіз ефективності деградації забруднювальних речовин під час анаеробного зброджування з урахуванням температурного режиму

Анаеробне зброджування, як правило, використовують для первинного очищення висококонцентрованих стоків із вмістом забруднень від 3000 мг/л ГПК (гранично-припустима концентрація). Системи очищення можуть працювати в різних температурних режимах – психрофільному (при температурі менше 20 °C),

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

						ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			21

мезофільному (при температурі 20-45 °С), термофільному (при температурі 50-65 °С). Швидкість очищення істотно залежить від температури і найбільш ефективними є термофільні методи очищення.

Однак, часто перевага у швидкості очищення не може компенсуватися тією кількістю тепла, яку необхідно підводити до системи. При термофільному режимі зброджування, практично повністю гинуть мікроорганізми сімейства ентерогрупи (кишкові палички) та яйця гельмінтів. Важливою умовою ефективного анаеробного зброджування є необхідність контролю температури, оскільки процес залежить від мікробіологічних процесів. Крім того, необхідно забезпечити відсутність кисню у реакційному метантенку.

Для організації необхідних умов та збільшення метаболічної активності бактерій слід враховувати такі фактори, що визначають ефективність процесу зброджування [16-18]: анаеробні умови у реакторі; температуру зброджування; склад вихідної сировини (наявність поживних речовин); вологість вихідної сировини; перемішування сировини, що зброджується; час зброджування; величину завантаження; кислотно-лужний баланс; співвідношення вмісту вуглецю та азоту; відсутність інгібіторів процесу. Визначити точний вплив кожного окремого фактора на кількість біогазу, що утворюється, аналітично не представляється можливим. Оскільки життєдіяльність бактерій можлива лише за відсутності кисню у реакторі біогазової установки, важливо забезпечити герметичність реактора.

Фугат гною свиней і рідкого гною дигестату характеризується низьким вмістом загального азоту, фосфору та калію. Фугат гною свиней та підстилкового гною дигестату, порівняно з рідким, містить у своєму складі втричі більше азоту та фосфору. Тверда фракція після сепарації ефекту містить близько 30 % вологи і характеризується підвищеним рН (8,2 – 9,2) та низькою зольністю (7,5 – 12,5 %). Вміст азоту у зразках дигестату після переробки різної сировини майже однаковий – на рівні 2% на суху речовину, причому амонійна форма становить близько половини загального азоту. Масова частка загальних сполук

Підп. і дата	Інв.№подл.
Взаєм.інв.№	Підп. і дата
Інв.№дубл.	Вип
Арк	№ докум.
Підп.	Дата

ОС 20510093

Арк

22

макроелементів органічної речовини після анаеробного термофільного зброджування (сирої речовини) показано на рис. 2.1.

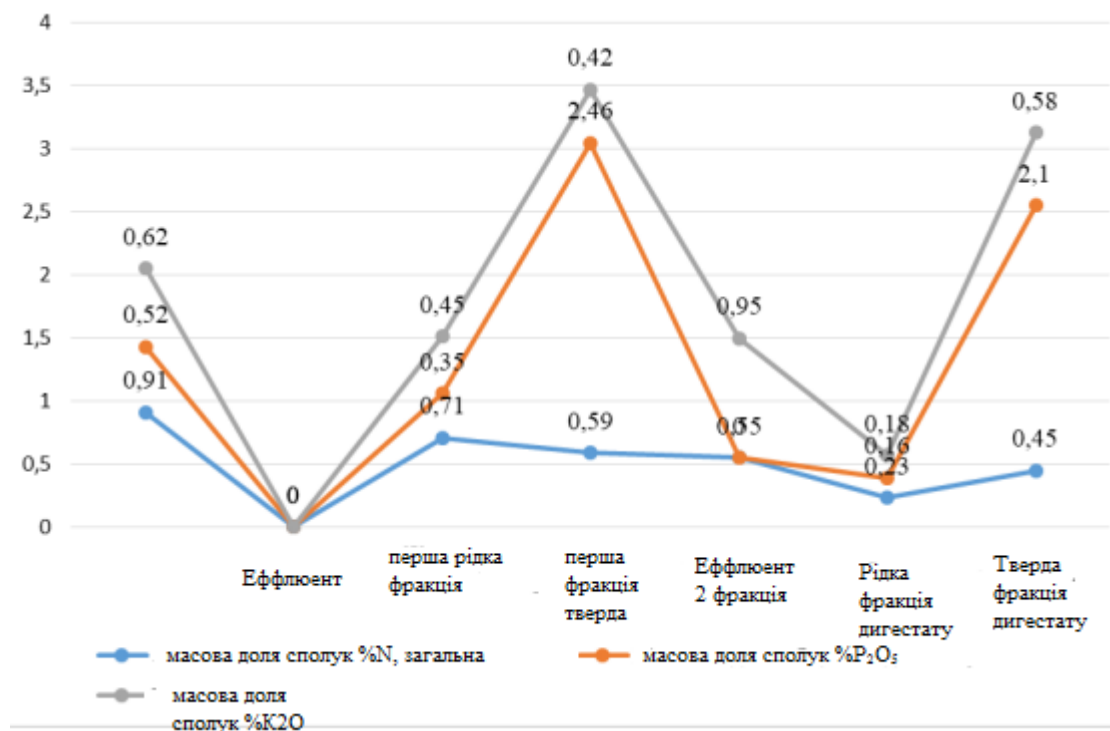


Рисунок 2.1 – Масова частка загальних сполук макроелементів органічної речовини після анаеробного термофільного зброджування (сирої речовини)

Досліджувалися процеси зброджування при температурах 35-37, 45-47 та 55-65 °С [31]. Процеси зброджування відбуваються за всіх температур, але швидкість зброджування різко відрізняється. Так, при проведенні зброджування в умовах кімнатної температури (без термостатування) процес тривав протягом 4 тижнів. При цьому вихід газу знижувався з 28-30 до 5-8 об'ємів на один об'єм рідини. Склад газу включав метан - 63% і вуглекислий газ - 36%. При низьких температурах спостерігалось досить високе значення залишкового ГПК (2800 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). Дані за впливом температури на параметри зброджування наведено у табл. 2.2.

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Таблиця 2.2 – Залежність ефективності зброджування мулу від температури

№	Температура, °С	Кислотна фаза, година	Фаза бродіння, година	Об'єм біогазу, л/л	ГПК кінцевий., мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
1	20-22	4 доби	4 тижня	5-8	2800
2	35-37	48-66	70-72	22-24	1250
3	55-56	24-25	25	28-30	900
4	63-66	-	-	-	-

При температурі 63–66 °С процес знезараження проходив протягом семи діб, що може свідчити про повну загибель мікрофлори мулу. Для дослідження поведінки системи авторами статті були проведені експерименти, в яких під час процесу зброджування мулу, реактор охолоджувався до 8–10 °С на 1,5–24 годин відповідно.

Різне зниження температури призводить до зупинки процесу зброджування вже через 10-15 хвилин після початку охолодження. Повторне прогрівання реактора та виведення температури на заданий рівень через зазначені інтервали часу призводили до відновлення бродіння, проте мірою збільшення часу охолодження збільшувалося час, необхідний клітинам для виходу із температурного стресу. Так, при тривалості охолодження 1 година вихід клітин із температурного шоку становив 1,5 години, при 5 годинах - 6 годин, при 24 - 12-16 годин. Короткочасне охолодження не призвело до наступного зміни в якісних та кількісних характеристиках процесу очищення [34].

### 2.3 Вплив додаткових факторів на ефективність розкладання поліютантів у дигестаті

Із усіх методів, описаних у різних публікаціях, можна виділили шість найдієвіших по відношенню до розкладання великого спектру органічних сполук (рис. 2.2).

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ОС 20510093

Арк

24



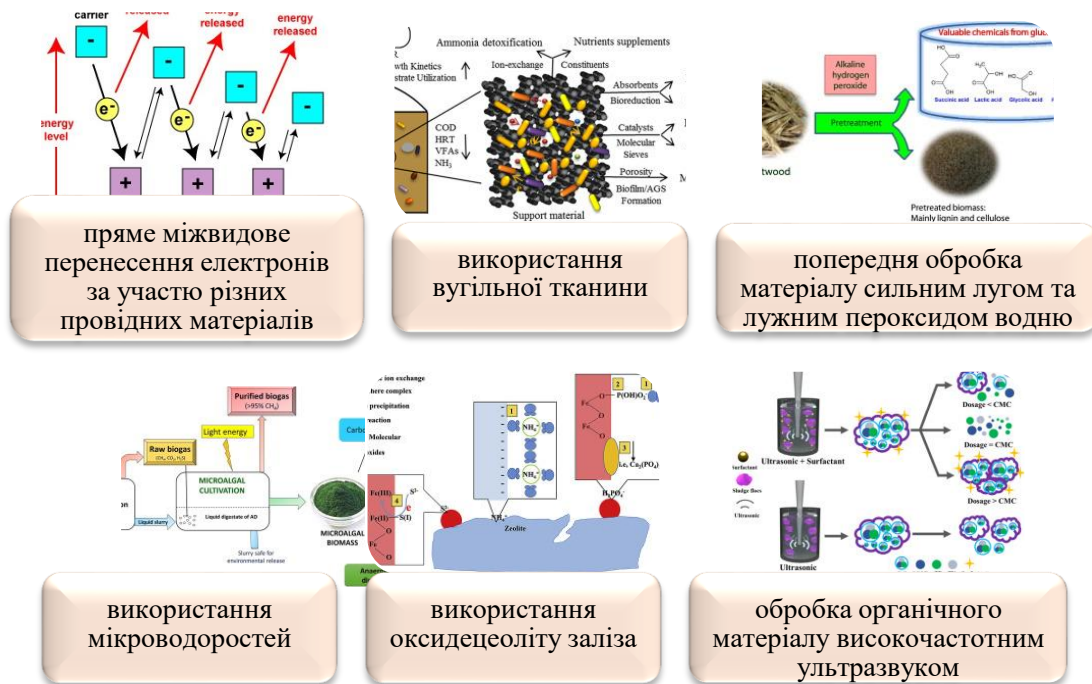


Рисунок 2.2 – Систематизація методів інтенсифікації процесу деградації забруднювальних речовин під час анаеробного збродження органічних відходів

На біогазових установках обладнаних мішалками одночасне перемішування та підігрів циркулюючого та свіжого субстрату дозволяє точно регулювати температуру бродіння [44].

Розведення субстрату водою не лише зменшує концентрацію, а й призводить до глибших змін у процесі збродження. Були проведені дослідження щодо вивчення швидкості збродження розведених стоків політантів у дигестаті. Стоки розбавляли водою у співвідношеннях: вода/мул - 10/90, 20/80, 40/60. Результати експериментів наведено у табл. 2.2. [45].

Таблиця 2.2 – Результати збродження при розведенні мулу водою

№	Співвідношення вода/мул	Кислотна фаза, година	Фаза бродіння, година	Об'єм біогазу, л/л	ГПК кінцевий., мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
1	10/90	28-29	24-25	26	740
2	20/80	40-42	30-32	20	720
3	40/60	процес бродіння не розпочався протягом 7 діб			

Різке зниження швидкості очищення під час розведення стоків водою автори статті [46], пояснюють тим, що у воді присутній у достатній кількості кисню. Він повністю і незворотно інгібує процеси бродіння, оскільки мікроорганізми, що розвиваються в метантенках, є суворими анаеробами – не переносять навіть незначні концентрації розчиненого кисню. Незворотні зміни мікрофлори при контакті з киснем повітря підтверджено в експериментах із примусовим аеруванням.

Наприклад, Igoni та ін. [47] досліджували конструкції анаеробних варильних котлів для виробництва біогазу з твердих побутових відходів та проаналізували вплив різних параметрів, таких як контроль температури, рН, співвідношення C/N, вміст вологи, частки відходів та вплив змішування на характеристики біогазового продукту. Zhang та ін. [48] порівняли ефективність зброджування вихідних сегрегованих побутових відходів та механічно відновленої фракції ТПВ. Вони прийшли до висновку, що вищий відсоток біорозкладності, що веде до більш високого енергетичного потенціалу, може бути досягнуто, якщо органічна фракція ТПВ відокремлена біля джерела.

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата	ОС 20510093					Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата						26

## РОЗДІЛ 3 ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕГРАДАЦІЇ ОКРЕМИХ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У ДИГЕСТАТІ РІЗНОГО ГЕНЕЗИСУ

3.1 Руйнування фармацевтичних препаратів та засобів особистої гігієни, що містяться в осадах стічних вод

Потенційні скиди забруднюючих речовин та мікроорганізмів у навколишнє середовище можуть відбуватися за рахунок:

- побутових стічних вод, забруднених людиною;
- стічних вод із лікарень;
- тваринництва та ветеринарної медицини;
- промислового виробництва лікарських засобів.

Зазвичай побутові стічні води та стічні води з лікарень знешкоджуються у відповідних муніципальних очисних спорудах. Крім того, у лікарських установах використовуються препарати, особливо контрастні речовини з організму пацієнтів, що призводить до значної їхньої концентрації в муніципальних очисних спорудах.

Осад стічних вод утворюється як побічний продукт на очисних спорудах (STP). Повідомляється [52], що 53% осаду стічних вод утворюється в Європі, та використовується в сільському господарстві безпосередньо або після компостування. Сільськогосподарське використання не тільки представляє найдешевший варіант для утилізації мулу, але також забезпечує корисне добриво (завдяки вмісту органіки, азоту та фосфору в осаді стічних вод) і матеріал для поліпшення ґрунту (наприклад, для відновлення занедбаної землі або покращення вмісту гумусу та води).

Оскільки немає бар'єру для мікрозабруднювачів, то вони або безпосередньо переходять у джерела води, або опосередковано через опади стічних вод, використовувані як добрива. Ветеринарні препарати та їх метаболіти

Підп. і дата	
Інв.№подл.	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	

						ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			27

перебувають у гною тварин і можуть бути змиті в ґрунт і ґрунтові води або безпосередньо потрапити у поверхневі води. Завдяки вимогам GMP (Good Manufacturing Praxis), принаймні у Європі та Північній Америці, фармацевтичні та хімічні виробничі об'єкти різко знизили свої викиди активних речовин на відміну від таких країн, як, наприклад, Індія [53].

Стічні води від синтезу хелатних агентів для миючих засобів та засобів для чищення, целюлозно-паперової промисловості і сільського господарства переважно містять ЕДТА. Потік стоків, що виходить від ЕДТА-виробничої лінії, містить повністю біодоступні стічні води, за винятком ЕДТА, що залишився після стадії екстракції. Цей вид очищення стічних вод застосовується також для селективного видалення АРІ з промислових стічних вод на багатьох фармацевтичних виробничих майданчиках провідних фармацевтичних компаній. На рис. 3.2 відображається крива деградації ЕДТА. Примітно наявність невеликого зниження NTA, який добре біорозкладається, а ЕДТА практично повністю руйнується [55].

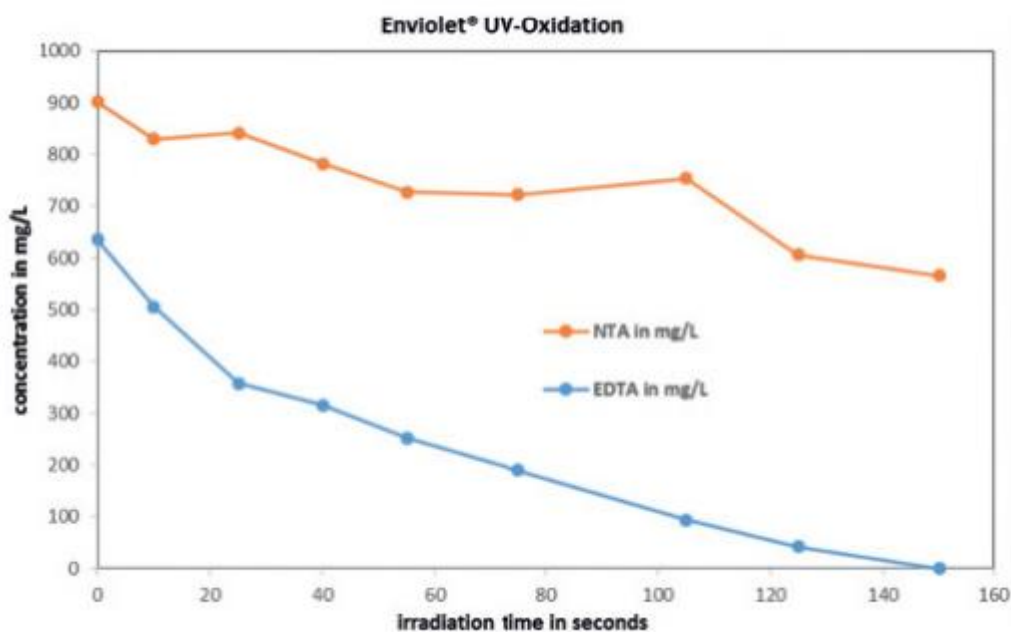


Рисунок 3.1 – Селективне руйнування ЕДТА на заводі BASF Людвігсхафен, Німеччина

Підп. і дата	Підп. і дата
Взаєм. інв. №	Взаєм. інв. №
Інв. № дубл.	Інв. № дубл.
Вип	Арк
№ докум.	Підп.
Дата	Дата

Технології анаеробного зброджування дозволяють максимально використовувати корисні ресурси, що містяться в осаді (вироблення енергії з біогазу, утилізація поживних речовин та вуглецю в сільському господарстві). У регіонах, де встановлені обмеження на використання осаду стічних вод у сільському господарстві, осад після анаеробного зброджування можна спалювати з виробленням енергії.

У цій роботі розглядаються три види анаеробного зброджування, які найбільш широко використовуються у світі:

- Мезофільне АС;
- Термофільна АС; і
- Поглиблене АС (УАС) із попередньою термообробкою.

Процес анаеробного зброджування включає чотири основні етапи:

1. Гідроліз – складні молекули органічних сполук розпадаються на прості цукри, амінокислоти та жирні кислоти;

2. Ацидогенез – перетворення цукрів на леткі жирні кислоти (ЛЖК);

3. Ацетогенез – ацетогенні бактерії споживають прості молекули, що утворилися на етапі ацидогенезу, і виробляють, в основному, оцтову кислоту, а також діоксид вуглецю та водень;

4. Метаногенез – метаногенні бактерії споживають проміжні продукти попередніх етапів і перетворюють їх на метан, діоксид вуглецю та воду. З відмерлих бактерій виходить дигестат. Зазвичай, для обробки осаду стічних вод обмежуючим фактором є ступінь гідролізу (перший етап), який задає загальний ступінь деструкції твердих речовин. Технології поглибленого АС дозволяють посилити гідроліз і, відповідно підвищити ступінь деструкції твердих речовин та вироблення біогазу.

Анаеробне зброджування (АД), основний процес стабілізації стічних вод, має обмежену біологічну здатність видаляти ОМР. Таким чином, залишкові концентрації ОМР можна регулярно виявляти в перевареному мулі на рівнях вище 1 мг/кг. Широкий вибір ОМР також було виявлено при нижчих

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ОС 20510093

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

29

концентраціях, сприяючи потенційній появі негативних синергічних ефектів на навколишнє середовище. Ємність анаеробного процесу повинна максимально відповідати майбутнім законодавчим обмеженням ОМР у твердих біологічних речовинах, які прагнуть безпечного застосування мулу на сільськогосподарських полях. Для цього необхідно рухатися від простого моніторингу ефективності видалення до розуміння факторів впливу.

Деякі автори припускають, що є два основних механізми впливу на ОМР, сорбція та біотрансформація можуть бути взаємопов'язані, оскільки сорбція може змінювати швидкість біотрансформації та біодоступність ОМР під час АД. Коефіцієнт ( $K_d$ ) підходить для прогнозування розподілу між фазами та для кількісного визначення сорбції ОМР у твердих матрицях. Біотрансформація, ймовірно, відбувається через метаболізм, через низькі концентрації ОМР порівняно з основним субстратом росту. Цей процес біотрансформації впливає на фізико-хімічні властивості ОМР, мікробне різноманіття, ферментативну активність та екологічні та експлуатаційні параметри.

Більшість досліджень про АД зосередилися на оцінці впливу температури, часу утримання осаду (SRT) і рівню органічного навантаження (OLR) на видалення ОМР, зробивши висновок, що ці параметри актуальні лише для кількох сполук. Тим не менш, мало відомо про інші фактори, такі як склад мікробної популяції та метаболізм, пов'язаний зі специфічними ферментами, та їх відносне значення на біотрансформацію ОМР під час АД. Важко визначити, як мікробне різноманіття впливає на трансформацію ОМР, оскільки існує величезна різноманітність мікроорганізмів багатоетапний процес АД. Виходячи з їх фізіології, харчових потреб, кінетики росту та чутливості до умов зовнішнього середовища вони можуть поділяють на дві основні групи: кислотоутворюючі та метаноутворюючі мікроорганізми.

Біотрансформація органічних мікрозабруднювачів (ОМЗ) на очисних спорудах зрештою залежить від ферментативної активності, що розвивається в кожному біологічному процесі. Проте мало дослідницьких зусиль було зроблено

Підп. і дата
Інв. № добул.
Взаєм. інв. №
Підп. і дата
Інв. № докл.

										ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата							30

для уточнення та визначення ролі ферментів у видаленні ОМР, що є важливим знання для визначення потенціалу біотрансформації лікувальних технологій. Автори [61] дослідили ферментативну трансформацію 35 ОМРs в анаеробних умовах, які ще менше вивчені, ніж аеробні системи. Спочатку в 13 ОМП було виявлено, що вони піддається значній біотрансформації (>20%) анаеробним мулом, отриманим із повномасштабного анаеробного варителя, що визначило їх як потенційні мішені для анаеробних ферментів.

Нативні ферменти були витягнуті з цього анаеробного осаду для виконання аналізів трансформації з ОМР. Крім того, вплив детергентів на відновлення мембранних ферментів, а також вплив кофакторів та інгібіторів суттєво вплинуло на стимулювання і пригнічення специфічної ферментативної активності. Загалом вдалося відновити ферментативну активність щодо 10 із цих 13 цільових ОМР (ацетилсульфаметоксазол та продукт його трансформації сульфаметоксазол, ацетамінофен, атенолол, кларитроміцин, циталопрам, клімбазол, еритроміцин, тербутрин, венлафаксин), а також до 8 нецільових ОМП (диклофенак, йопамідол, ацикловір, ацесульфам і 4 різні гідроксильовані метаболіти карбамазепіну). Деякі ферментні активності, ймовірно, залучені до анаеробної біотрансформації цих ОМР. Таким чином, це дослідження є відправною точкою для розгадки все ще загадкової біотрансформації ОМРs у системах очищення стічних вод.

У більшості установок анаеробного зброджування осаду стічних вод застосовують мезофільний процес (рис. 3.2). Мезофільне анаеробне зброджування (МАС) проходить з участю бактерій, для яких оптимальна температура знаходиться в діапазоні від 33 до 37°C. У традиційних установках анаеробного зброджування здійснюється обробка осаду з вихідною концентрацією сухої речовини 4-6% (хоча вміст СВ може бути і вище, до 7%, що підвищує ефективність процесу протягом 15-18 днів. Зі збільшенням концентрації СВ у вихідному осаді, він стає більш в'язким, його реологічні властивості змінюються, ускладнюючи перемішування. В середньому, традиційні метантенки працюють із навантаженням 2,75 кгЛТВ/м<sup>3</sup>/доба (ЛТВ = легкі тверді речовини),

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

але в галузевій практиці прийнято стандартне навантаження 2,5 кгЛТВ/м<sup>3</sup>/Добу. Нестача традиційних установок МАС полягає в тому, що їхня ефективність знижується при підвищеному вмісті ІАІ в суміші, що завантажується (більше 55%), так як ІАІ погано зброджується.

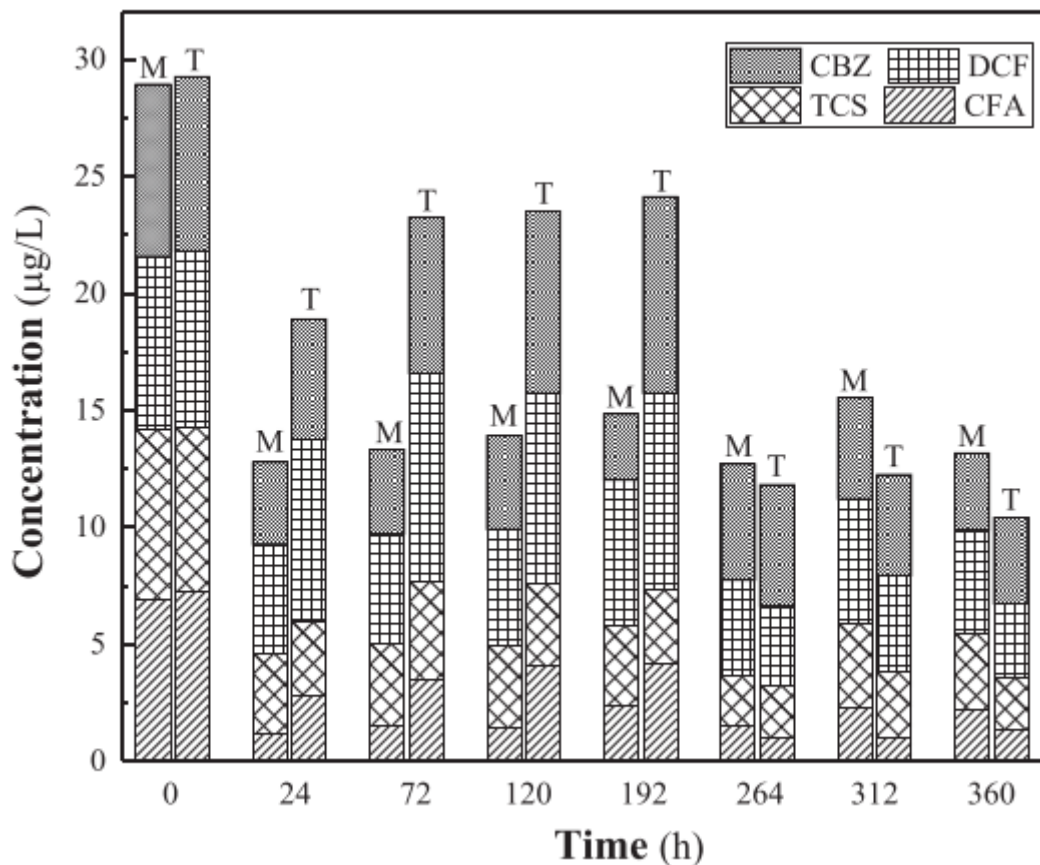


Рисунок 3.2 – Цільові PhACs в осаді стічних вод під час MEAD при мезофільних (М) та термофільних (Т) умовах

Для варіантів без анаеробного зброджування, фугат від процесів згущення та зневоднення можна безпосередньо повернути в голову очисних споруд (або через буферний резервуар, щоб згладити піки припливу). Якщо ж у схему обробки осаду входить анаеробне зброджування, то у фугат від зневоднення осаду після зброджування матиме вищі концентрації забруднюючих речовин. Насамперед, це стосується фугату на установках УАС з ПТГ, який містить більше аміаку, ніж фугат від зневоднення осаду після МАС та ТАС. Такі сильно забруднені фугати зазвичай направляють на попереднє очищення, щоб знизити вміст аміаку (а

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	



також, у багатьох випадках, фосфору) перед поверненням у голову очисних споруд.

Норми видалення фармацевтичних препаратів коливаються в значних межах. Поєднання АД з ультразвуковим опроміненням (рис. 3.3), механічна обробка ротаційних дисків і ензимоліз, відповідно, може покращити продуктивність видалення загалом на близько 10%. Можлива попередня обробка ультразвуковим опроміненням могла б бути найбільш ефективним для посилення видалення PhAC під час АД тоді як ензимоліз виконувався погано, оскільки ферменти були жорсткими до навколишнього середовища, і потрібен був тривалий час, щоб адаптуватися до середовища.



Рисунок 3.3 – Селективна установка з ультразвуковим опроміненням для підсилення видалення PhAC [61]

Комплексні процеси АД разом із фізико-хімічними і біологічними методами обробки можна розглянути для покращення видалення PhAC з осаду стічних вод, хоча АД тільки частково видаляє PhACs, залишаючи сліди фармацевтичних препаратів та засобів особистої гігієни.

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

### 3.2 Трансформація стійких органічних забруднювачів на прикладі пестицидів, що містяться у сільськогосподарській сировині

Забруднення ґрунту СОЗ (persistent organic pollutants) - пестицидами є однією з важливих екологічних проблем у світі, та в Україні через їхню токсичність і загрози для людського життя та навколишнього середовища. Широке виробництво, велика закупівля пестицидної продукції урядами, погане управління запасами, небажанням вносити зміни та використання їх після заборони до застосування призвело до їх накопичення. Тони застарілих пестицидів накопичуються у всьому світі і становлять небезпеку для здоров'я людини та навколишнього середовища як на місцевому, так і на глобальному рівні [57]. Значна кількість застарілих пестицидів входить до групи СОЗ та викликає особливе занепокоєння через їх токсичність, стійкість, перенесення на великі відстані та накопичення в жирових тканинах людей і тварин. Застарілі запаси пестицидів не тільки становлять небезпеку для здоров'я населення та навколишнього середовища, але також можуть забруднювати природні ресурси та перешкоджати соціально-економічному розвитку [58].

За даними IPEN, в Україні є запаси СОЗ, що містять пестициди, а також забруднені території. Вогнища забруднення ґрунтів відходами пестицидів, що належать до СОЗ, численні та розподілені хаотично по всій території країни. Інвентаризацією пестицидів із властивостями СОЗ охоплено лише 20% території країни. СОЗ – це група стійких органічних забруднювачів а також токсичних хімічних речовин, які накопичуються в навколишньому середовищі, акумулюються в жирових тканинах живих організмів та людини, завдаючи непоправної шкоди здоров'ю. СОЗ не руйнуються в навколишньому середовищі протягом тривалого часу, переносяться повітрям і водними масами на великі відстані, далеко від початкового джерела забруднення.

Відповідно до Стокгольмської конвенції до СОЗ належать 12 хімічних речовин, і 9 хлорорганічних пестицидів, а саме: ДДТ, альдрін, дельдрін, ендрин,

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

хлордан, гептахлор, мірекс та токсафен. Список СОЗ постійно збагачується новими речовинами, наприклад, на четвертій нараді Конференції Сторін, було включено 9 додаткових хімічних речовин, з них 5 пестицидів (хлордекан,  $\alpha$ -гексахлорциклогексан,  $\beta$ -гексахлорциклогексан, ліндан, пентахлорбензол), а у 2015 році до списку були включені бромовані антипірени та пов'язані з ними попередники такі як перфторовані алкіловані речовини [59]. Відповідно до Стокгольмської конвенції, речовини, віднесені до СОЗ повинні бути знищені.

Залежно від типу сировини існує певна специфіка щодо вмісту різних забруднювальних речовин у дигестаті. Наприклад, у суміші тваринних і рослинних відходів, що представляє собою гній сільськогосподарських тварин поряд з різними рослинними залишками, можуть міститися пестициди наприкладі гідрохлордеконів і поліхлороінденів, амфіциліну і різних жирних кислот та спиртів [60]. Одним із ефективних методів очищення ґрунтів, забруднених неорганічними та органічними забруднювачами, у тому числі застарілих пестицидів, є спалювання їх у спеціальних високотемпературних котлах. Однак цей метод потребує великих капіталовкладень. Застосування технології фітореMediaції є перспективним, оскільки цей підхід може задовольнити вимоги очищення і є досить рентабельний з економічної точки зору.

Хлордекон ( $C_{10}C_{11}O_2H_2$ ; CLD) є хлорорганічним пестицидом, який широко використовувався у Французькій Вест-Індії (FWI) між 1972 і 1972 роками 1993 проти бананового чорного довгоносика *Cosmopolites sordidus*. Його масове застосування призвело до тривалого забруднення навколишнього середовища CLD, де концентрації в ґрунтах вищі за 1 мг. кг. CLD також накопичується в харчових ланцюгах, наприклад, зараження тварин, які вирощуються на відкритому повітрі мимовільне заковтування ґрунту. Заражена їжа є основним джерелом спостерігалого значне опромінення людини (понад 90 % популяції FWI).

CLD може метаболізуватися в організмі людини та кількох інших ссавців. За даними Fariss та ін., CLD спочатку відновлюється в печінці до хлордеколу

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

(CLDOH), його алкольної форми, яка може бути трансформована далі сульфатні та/або глюкуронідні кон'югати. У вівцематок інфікований внутрішньовенно CLD, його елімінація відбувається в першу чергу через кал (переважно як CLD і меншою мірою як CLDOH) та незначно в сечі (CLD та кон'юговані форми). Було показано, що період напіввиведення CLD становить від 5 днів (кури-несучки) до 55 днів (свині). Таким чином, зниження його концентрації в продуктах тваринного походження може досягатися, якщо тварин очищають перед забоєм.

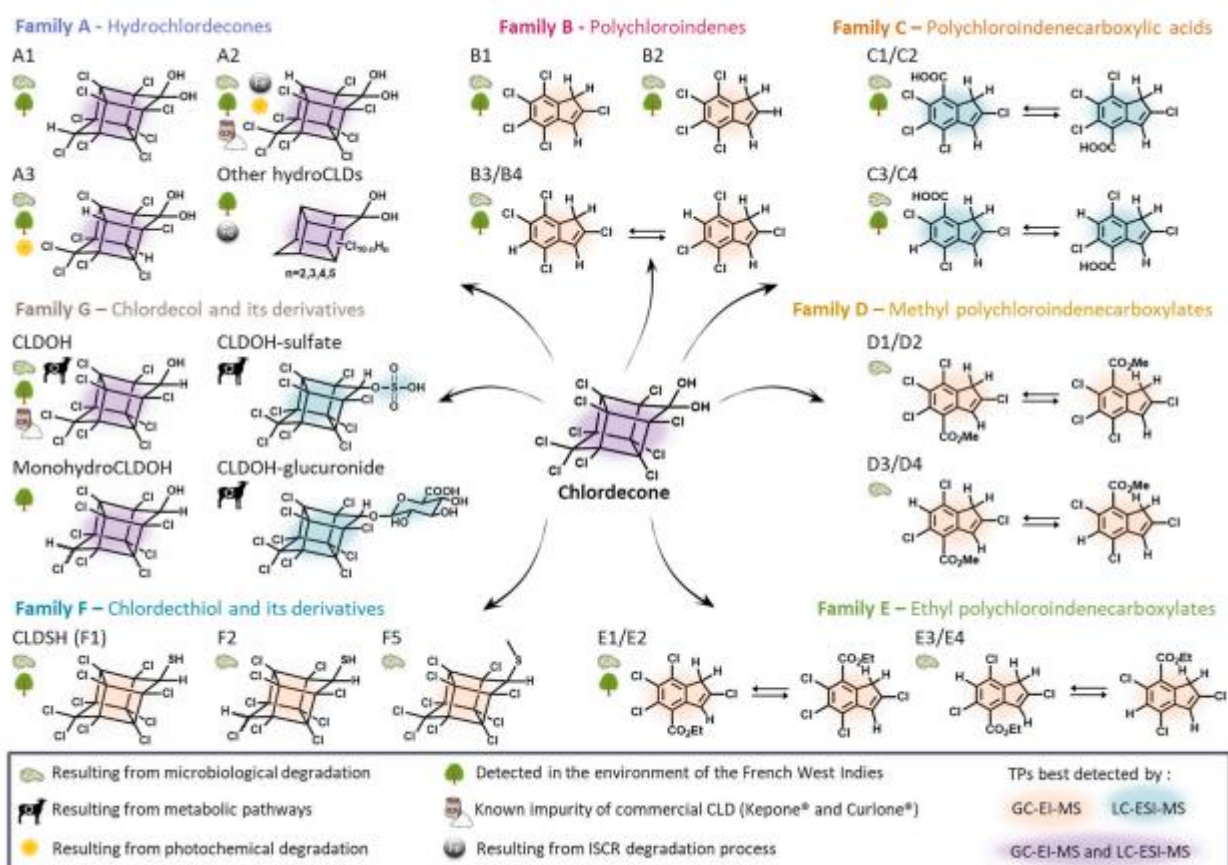


Рисунок 3.8 – Огляд семи сімейств продуктів перетворення хлордекону. Для наочності відображаються лише конгенери з вищим вмістом хлору

Дехлорування CLD було досягнуто абіотичним шляхом після УФ-опромінення, а також у відновних умовах (нульовалентні залізо), що призводить до утворення гідрохлордеконів (сімейство А,  $C_{10}Cl_{10-n}O_2H_{2+n}$ ,  $1 \leq n \leq 5$ ) (рис. 3.8). Цікаво, що кільце-розкриття в bishomocubane клітина CLD спостерігалася за

Підп. і дата  
Взаєм.інв.№ Інв.№дубл.  
Підп. і дата  
Інв.№подл.

наявності зниженого вітаміну В12, що призводить до додаткового утворення поліхлорінденів (родина В,  $C_9C_{16-n}H_{2+n}$ ,  $1 \leq n \leq 3$ ) та поліхлорінденкарбонових кислот (сімейство С,  $C_{10}C_{15-n}H_{3+n}O_2$ ,  $1 \leq n \leq 5$ ). Огляд семи сімейств продуктів перетворення хлордекону. Для наочності відображаються лише конгенери з вищим вмістом хлору.

У [62] досліджено рівні концентрації та розсіювання сучасних пестицидів під час компостування та витравлення на заводі. З 271 проаналізованого пестициду виявлено 28. В трьох досліджених валоках загальні концентрації становили від 36 до 101 мг на кг сухої речовини (d.m.) у вхідних матеріалах від 8 до 20 мг/кг d.m у компостах після 112 днів обробки. Фунгіциди і серед них триазоли явно переважали над іншими пестицидами. Більше двох третин усіх пестицидів, виявлених у вхідних матеріалах, показали швидкість розсіювання вище 50% під час композиції.

### 3.3 Рекомендації щодо застосування додаткових методів для деградації забруднювальних речовин у дигестаті

Для підвищення ефективності анаеробного розкладання твердих побутових відходів рекомендуємо застосовувати метод прямого міжвидового перенесення електронів, що є видом мікробного анаеробного зброджування і полягає у проходженні таких чотирьох стадій, як гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез [63]. На рис. 3.9 подано схему прямого міжвидового перенесення електронів у застосуванні до анаеробного розкладання багатокomпонентних твердих побутових відходів. Основний механізм переносу електронів, опосередкований воднем включає два види мікроорганізмів: ацидогенні бактерії та гідрогенотрофні метаногени. Ацидогенні бактерії розкладають органічні відходи на кислі побічні продукти, утворюючи  $H_2$ . Утворений  $H_2$  потім служить донором електронів для гідрогенотрофів метаногени, які поєднують  $H_2$  з  $CO_2$  для утворення метану.

Підп. і дата	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Інв.№подл.

ОС 20510093

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

37

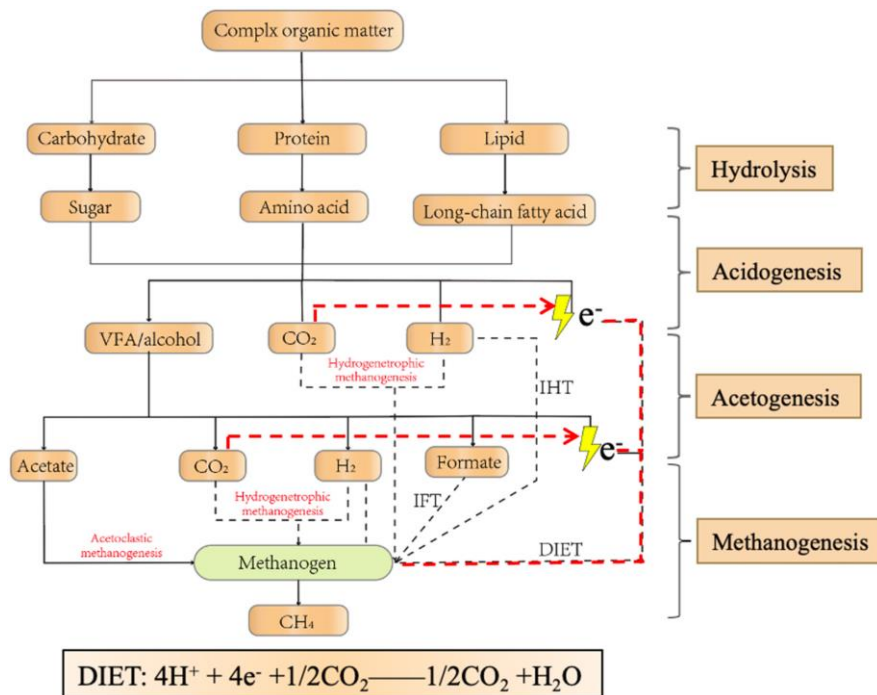


Рисунок 3.9 – Схема прямого міжвидового перенесення електронів по відношенню до анаеробного розкладання багатокomпонентних твердих відходів

Ефективність застосування методу прямого міжвидового перенесення електронів при анаеробному зброджуванні твердих відходів відносно маси субстрату наведена на рис. 3.10.

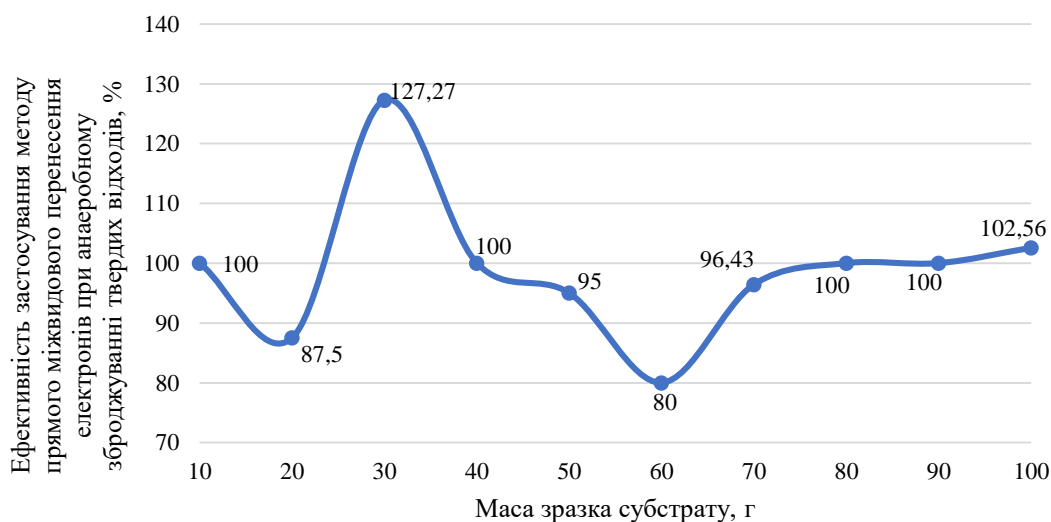


Рисунок 3.10 – Ефективність застосування методу прямого міжвидового перенесення електронів при анаеробному зброджуванні твердих відходів відносно маси субстрату

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

Ефективність щодо впровадження методу прямого міжвидового перенесення електронів по відношенню до анаеробного зброджування твердих відходів становить у середньому 98,88 %, що майже співвідноситься із даними у дослідженні [63].

Незважаючи на постійні виклики розглядаючи термодинамічну дилему  $H_2$ , нещодавно було зроблено проривне відкриття, пов'язане з прямим міжвидовим переносом електронів (DIET). Для міжвидової дифузії електронів під час AD ДІСТА є альтернативою міжвидовій передачі  $H_2$  (ІНТ) (рис. 1.11с). Це модель переносу електронів, яка не залежить від дифузійних середовищ, ефективно усуває термодинаміку питань. Крім того, синтрофічний метаболізм, в якому домінує ДІСТА, більш стабільний ніж обмін дифузійних проміжних продуктів (таких як  $H_2$ ), які можуть бути втраченими в навколишньому середовищі та є більш чутливими до навколишнього середовища хімічні коливання

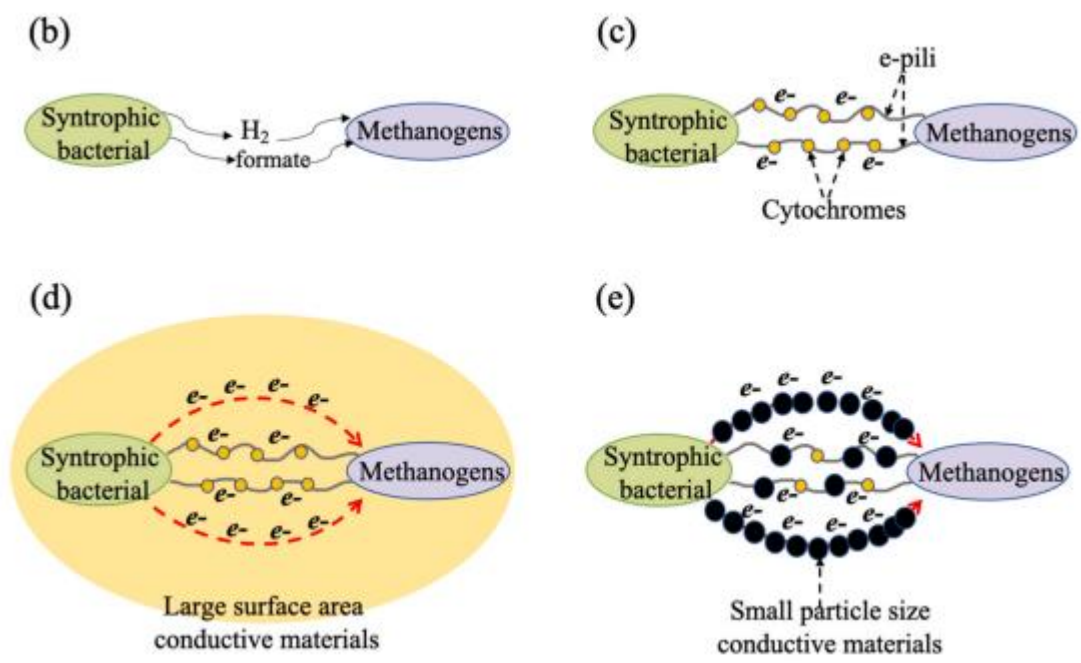


Рисунок 3.11 – Етапи та механізм міжвидового переносу електронів: (а) етапи АД; (б) МІЕТ, сприяний  $H_2$  або форміатом; (с) ДІЕТ, опосередкована е-пілі або цитохромами; (д) провідні матеріали з великими частинками, що компенсують відсутність ДІЕТ з домінуванням е-пілі; (е) провідні матеріали з дрібними частинками, що компенсують дефіцит ДІЕТ з домінуванням цитохрому.

Інв. №подл.	Підп. і дата
Взаєм. інв. №	Підп. і дата
Інв. №дубл.	Підп. і дата

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Техніка безпеки під час роботи у біогазовій лабораторії

Безпека поводження з біогазом - це найважливіший аспект, який слід враховувати при очищенні очисних споруд. Йдеться як про життя тих, хто експлуатує біогазову систему, так і про життя людей навколо установки з виробництва та використання біогазу. В цьому розділі представлені ризики, пов'язані з функціонуванням однієї з цих систем, а також заходи, що застосовуються для зменшення ймовірності аварій.

Перше, на що потрібно звернути увагу це компоненти біогазу. Адже при витоку газу, велика концентрація газу може призвести до вибуху, смерті персоналу через отруєння або витіснення кисню. Основні компоненти біогазу та їх потенційний вплив наведено в табл. 4.1.

Зважаючи на склад біогазу та його властивості, можна виділити 3 основні ризики при роботі на БГУ:

- асфіксія шляхом витіснення повітря в обмежених просторах або присутністю газових компонентів із задушливою дією;
- ризики для здоров'я від деяких компонентів газу, такі як отруєння під впливом біогазу з високою концентрацією H<sub>2</sub>S;
- вибух внаслідок утворення вибухонебезпечних газоподібних сумішей.

Одним із сценаріїв аварії на БГУ це вибух і для нього потрібне виконання таких умов:

- наявність вибухонебезпечної горючої / повітряної суміші;
- наявність джерела займання достатньої енергії;

Інв.№подл.	Підп. і дата
Взаєм.інв.№	Підп. і дата
Інв.№дубл.	Підп. і дата
Підп. і дата	Підп. і дата

ОС 20510093

Арк

40

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------



Таблиця 4.1 - Небезпечні компоненти біогазу та їх вплив [64]

	Особливості	Щільність	Реактивність	Шкода для здоров'я	Концентрація
CH <sub>4</sub>	Без запаху	Більш легкий чим повітря (щільність = 0,72 кг / нм <sup>3</sup> )	Легкозаймистий (вибухонебезпечний між 5-15% об. в повітрі)	Витісняє повітря, можливий вибух	
CO <sub>2</sub>	Прогірклий запах	Важчий за повітря	Можливе накопичення в свердловинах або порожнинах	6-10% викликають проблеми з диханням та підвищенням артеріального тиску, збудження, серцебиття, головний біль	5000 ppm = 0.5% vol
H <sub>2</sub> S	100-250 ppm Запах гнилих яєць > 250 ppm без запаху	Важчий за повітря	Легкозаймистий (вибухонебезпечний між 4,3-4,5% об. в повітрі)	Ефекти впливу: <100 ppm - життя загрожує через кілька годин > 100 ppm: життя загрожує менш ніж за 1 год ~ 500 ppm: життя загрожує менш ніж за 30 хв	10 ppm
NH <sub>3</sub>	Різкий запах, викликає печіння очей	Більш легкий чим повітря	Легкозаймистий (вибухова речовина при 15-30 об.% у повітрі) При контакті з парою він утворює туман, важчий за повітря	Їдкий для вологої шкіри та слизових оболонок Смертельний до 0,5% (500 ppm) через 30-60 хвилин	50 ppm

Інв. №подл.	Підп. і дата	Взаєм. інв. №	Інв. №дубл.	Підп. і дата

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата

ОС 20510093

Арк

41

Якщо є джерело займання, небезпека вибуху виникає, якщо:

- достатня кількість біогазу з установок, що працюють із надлишковим тиском, проникає в обмежені простір;
- достатня кількість повітря проникає в агрегати, що працюють з невеликим вакуумом, утворюючи вибухонебезпечні суміші; які за звичайних умов герметично закриті;
- вибухові газоподібні суміші всмоктуються (наприклад, на звалищах надмірним всмоктуванням мулу).

Незважаючи на вміст метану, легкозаймистого газу, біогаз сам по собі не має вибухових властивостей. Для утворення вибухонебезпечної суміші метан і повітря повинні поєднуватися в певному діапазоні концентрацій. Крайністю цього інтервалу є нижня і верхня межі вибуховості, а сам інтервал називається вибуховим інтервалом; неможливо, щоб вибухи відбувалися поза межами вибухонебезпеки. Щоб розпочати процес горіння, повітря слід впорскувати контрольовано вище верхньої межі вибуховості. Нижче нижньої межі вона не є ні займистою, ні вибухонебезпечною.

Вибух вибухонебезпечної газової суміші відбувається лише тоді, коли подається певна енергія займання, яка, по суті, залежить від складу зазначеної суміші. Самозаймання також залежить від складу суміші. Мінімальна температура для самозаймання суміші метану та повітря складає орієнтовано 595°C.

Джерела займання включають наступне:

- нагріті поверхні ( $T > 500$  °C.);
- відкрите полум'я;
- іскри механічного походження;
- іскри електричного походження;
- блискавки.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата
-----	-----	----------	-------	------

ОС 20510093

Арк

42

## 4.2 Розрахунок штучної вентиляції для лабораторії з урахуванням специфіки запахів

Природна вентиляція може застосовуватися у формі наскрізного провітрювання, що здійснюється за рахунок вітрового напору, та у формі керованої вентиляції - аерації. Наскрізне провітрювання застосовується зазвичай у виробничих приміщеннях, або лабораторіях з великою кількістю працюючих та за відсутності в повітрі шкідливих виділень (токсичного пилу, парів та газів). Аерація використовується лише у приміщеннях із надлишковим теплом (так званих гарячих цехах) із виділенням тепла понад 23 Вт/м<sup>3</sup>. Зовнішнє повітря при аерації надходить у приміщення через відкриті віконні отвори та фрамуги, а забруднений, що забирає надлишок тепла, вологи, виробничий пил, видаляється з лабораторії через верхні отвори або спеціальні пристрої. Місцева природна витяжна вентиляція організується у вигляді витяжних шахт (труб), розташованих над місцями виділення гарячої пари та газів і виведені на дах будівлі. Для підвищення ефективності природної витяжки всередині витяжних шахт встановлюються дефлектори різної конструкції.

Побудником руху повітря при механічній вентиляції служать спеціальні пристрої (вентилятори, ежектори). Механічна вентиляція підрозділяється за напрямом повітряного потоку на проточна та витяжну. Вони можуть бути у формі загальної (загальної обмінної) та місцевої (локальної) вентиляції. Загальна обмінна вентиляція призначена для створення оптимальних та допустимих метеорологічних умов у всьому приміщенні. Вона зазвичай застосовується, якщо робочі місця рівномірно розташовуються по всьому приміщенню, а шкідливі виділення надходять у повітря робочої зони.

Припливні отвори загальної вентиляції, як правило, подають повітря в нижню (робочу) зону приміщення. Подача повітря у верхню зону можлива у двох випадках: при наявності в приміщенні постійних джерел пилу (щоб уникнути підйому осілого пилу) і водяної пари, які можуть конденсуватися в прохолодному

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

ОС 20510093

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

43

припливному повітрі, тому повітря подається нагрітим до 30-35 °С у верхню зону приміщення. Місцева припливна вентиляція (у комбінації з аерацією або механічною припливно-витяжною вентиляцією) застосовується, як правило, у гарячих цехах у вигляді «повітряного душа», що подає прохолодне (18 СС) повітря прямо на працюючого людини, «повітряної оази», що є огороженою водяною плівкою місце відпочинку робітників, всередину якого подається прохолодне повітря, а також у вигляді «повітряної теплової завіси» (потік теплого повітря не вище 50-70 °С у дверних зовнішніх отворах виробничих приміщень та біля зовнішніх воріт). Швидкість випуску повітря з щілин або отворів повітряних і повітряно-теплових мас має бути у зовнішніх дверей не більше 8 м/с та біля воріт - 25 м/с. Витяжна вентиляція призначена для видалення забрудненого шкідливими виділеннями повітря з лабораторій.

Ефективність роботи вентиляційних систем визначається кількістю повітря, що подається або видаляється з приміщення за одиницю часу, необхідного для зменшення концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони рівня ПДКрз. Для видалення аерозолів (пилу) швидкість руху повітря в отворі відкритого повітроводу має бути від 1,5 до 4 м/с. При видаленні парів та газів отруйних речовин швидкість руху повітря розраховується з урахуванням ступеня їх небезпеки (токсичності). Так, для малотоксичних речовин з ПДКрз, що перевищує 100 мг/м<sup>3</sup>, швидкість руху через отвори витяжних шаф має бути 0,5-0,7 м/с, для речовин з ПДКрз, що дорівнює або менше 100 мг/м<sup>3</sup> - 1 м/с. У перерізі відкритих відсмоктувачів (парасольок, бортових відсмоктувачів) швидкість видалення повітря рекомендується від 0,5 до 1,25 м/с. Необхідний об'єм повітря, що видаляється (Q), розраховується за формулою:

$$Q = v S \cdot 3600 \text{ (м}^3\text{/год), м}^3,$$

де  $v$  – швидкість видалення повітря через вентиляційний отвір, м/год;

$S$  – площа перерізу вентиляційного отвору, м<sup>2</sup>.

Визначення кратності повітрообміну

Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Підп. і дата	Інв.№подл.

ОС 20510093

Арк

44

Кратність повітрообміну (Кз) – величина, що показує, скільки разів повітря приміщення обмінюється протягом години, та визначається за формулою:

$$Kz = Q/V,$$

де Q – кількість повітря, що подається або видаляється з приміщення (v S/2 • t), м<sup>3</sup>/година;

V – обсяг приміщення, м<sup>3</sup>.

Перед величиною кратності повітрообміну зазвичай ставиться знак (+) або (-). В першому у випадку це означає повітрообмін по припливу, а в другому - по витяжці. Знаючи необхідний об'єм повітря, що подається або видаляється, можна розрахувати необхідну кратність повітря по притоку чи витяжці.

Розрахунок кількості повітря в окремих випадках (вказаних у нормативних документах) можна проводити за нормативною кратністю повітрообміну. Повітрообмін визначається за формулою:

$$\alpha = (n V) 3600 \text{ м}^3/\text{год},$$

де n – нормативна кратність повітрообміну (значення надано у відповідних актах), м<sup>3</sup>/год;

V – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>.

Інв.№подл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

ОС 20510093

Арк

## ВИСНОВКИ

Анаеробний дигестат, отриманий в результаті анаеробного зброджування органічної сировини, є перспективним біодобривом, здатним ефективно замінити мінеральні добрива. Використання дигестату не лише сприяє підвищенню врожайності сільськогосподарських культур, але й має значні екологічні переваги. Він містить велику кількість поживних речовин, таких як азот, фосфор і калій, які є необхідними для росту рослин, а також покращує структуру ґрунту, утримання води і зменшує потенціал ерозії ґрунту.

Екологічні переваги використання дигестату включають зменшення обсягів органічних відходів, що викидаються на полігони, і зниження викидів шкідливих газів. Крім того, дигестат сприяє зменшенню виведення азотних сполук у водні джерела, запобігаючи еутрофікації і забрудненню водних ресурсів. Анаеробне зброджування є ефективним методом деградації забруднювальних речовин у висококонцентрованих стоках, причому термофільні методи виявляються найефективнішими, хоча й вимагають значних витрат енергії для підтримання необхідної температури.

Для підвищення екологічної безпеки дигестату важливо застосовувати додаткові методи деградації забруднювальних речовин, такі як фізико-хімічні та біологічні методи, що дозволяють знизити вміст небезпечних речовин і покращити якість кінцевого продукту.

Для покращення екологічної безпеки рекомендовано впровадження додаткових методів очищення дигестату, таких як пряме міжвидове перенесення електронів, а також регулярний моніторинг якості дигестату перед його використанням як добрива.

Таким чином, анаеробний дигестат є перспективним біодобривом, що може значно сприяти сталому розвитку сільського господарства, зберігаючи екологічну рівновагу та підвищуючи врожайність культур.

Підп. і дата	
Інв. № дубл.	
Взаєм. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № подл.	

						ОС 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			46

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mazur V.A., Branitskyi Y.Y., Patsyryeva H.V. Bioenergy and economic efficiency technological methods growing of switchgrass. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. № 10 (2). P. 8-15.

2. Паламарчук В.Д., Кричковський В.Ю. Ефективність використання дигестату при вирощуванні моркви та буряків столових. *Корми і кормовиробництво*. 2020. № 90. С. 68-82.

3. Mazur V., Patsyryeva H., Mazur K., Myalkovsky R., Alekseev O. Agroecological prospects of using corn hybrids for biogas production. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 18. P. 205-219.

4. Петренко І.О. Інструменти економічного забезпечення екологічної безпеки в аграрному секторі. *АгроСвіт*. 2020. № 3. С. 15-21.

5. Рибіна Л.О. Екологічні аспекти інноваційного розвитку АПК. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2009. № 2. С. 78-83.

6. Amanpreet S., Harmandeep S. Organic Grain Legumes in India: Potential Production Strategies, Perspective and Relevance. *Legume Crops - Prospects, Production and Uses*. 2020. P. 1-18. DOI: 10.5772/intechopen.93077.

7. Nosheen S., Ajmal I., Song, Y. Microbes as Biofertilizers a Potential Approach for Sustainable Crop Production. *Sustainability*. 2021. 13 (4). P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13041868>.

8. Kaletnik H., Pryshliak V., Pryshliak N. Public Policy and Biofuels: Energy, Environment and Food Trilemma. *Journal of Environmental Management & Tourism*. 2019. Vol. 10. № 2 (24). P. 479-487.

9. Мазур В.А., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Обґрунтування адаптивної сортової технології вирощування зернобобових культур в правобережному Лісостепу України. *Сільське господарство та лісництво*. 2020. Вип. № 18. С. 5-17.

Підп. і дага	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дага	
Інв.№подл.	

10. Панцирева Г.В. Вплив технологічних прийомів вирощування на зернову продуктивність зернобобових культур в умовах правобережного Лісостепу України. Наукові доповіді НУБІП. 2020. Вип. № 5 (87). С. 1-9.

11. Arthurson V. Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land – potential benefits and drawbacks. *Energies*. 2009. V. 2. P. 226–242. doi:10.3390/en20200226

12. Seadi T.AI., Lukehurst C.T. Quality management of digestate from biogas plants used as fertilizer. *IEA Bioenergy*. 2012. 38 p.

13. Honcharuk I., Matusyak M., Pansyryeva H., Kupchuk I., Prokopchuk V., Telekalo N. Peculiarities of reproduction of pinus nigra arn. in Ukraine. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2022. Vol. 15 (64). № 1. P. 33-42.

14. Таврель, М. І., Кіпко, О. Е., Шмандій, В. М., Катков, М. В., Мерзлікін, А. В., Костенко, В. К., ... & Богомаз, О. П. (2023). Екологічні проблеми сучасності [Електронний ресурс]: зб. матер. І Міжнар. наук.-практ. конф.(Луцьк, 10 травня 2023 р.)/Держ. вищ. навч. заклад «Донецький національний технічний університет». –Луцьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2023.–117 с. У збірнику подано матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми сучасності» за тематикою: техногенна безпека.

15. Appels, L. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge / L. Appels, J. Baeyens, J. Degreève, R. Dewil // *Progress in Energy and Combustion Science*.– 2008.– N34(6).– P. 755–781.

16. P. Morard, 'Les Cultures Végétales Hors Sol', Publications Agricoles Agen, Paris, 2020.

17. B.A. Kahn, J.K. Hyde, J.C. Cole, P.J. Stoffella and D.A. Graetz, 'Replacement of a Peat-Lite Medium with Compost for Cauliflower Transplant Production', *Compost Science and Utilization*, Vol. 13, pp. 175 - 179, 2019.

18. J.G. Fuchs, U. Galli, K. Schleiss and A. Wellinger, 'Caractéristiques de Qualité des Composts et des Digestats Provenant du Traitement des Déchets Organiques',

Підп. і дата	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	



Association Suisse des Installations de Compostage (ASIC) & Forum Biogaz Suisse, 26 p., 2021.

19. Dinh Pham Van. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends [Электронний ресурс] / Dinh Pham Van // Environmental Engineering Research. - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <http://www.eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eeer.2018.334>.

20. Zhang, S., Li, Y., Jiang, L., Chen, X., Zhao, Y., Shi, W., & Xing, Z. (2024). From organic fertilizer to the soils: What happens to the microplastics? A critical review. Science of The Total Environment, article number 170217. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170217.

21. Golovko, O., Ahrens, L., Schelin, J., Söregård, M., Bergstrand, K. J., Asp, H. & Wiberg, K. (2022). Organic micropollutants, heavy metals and pathogens in anaerobic digestate based on food waste. Journal of Environmental Management, 313, article number 114997. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114997.

22. Gizaw, D. G., Periyasamy, S., Redda, Z. T., John, B. I., Baylie Mengstie, H., & Asaithambi, P. (2024). A comprehensive review on sewage sludge as sustainable feedstock for bioenergy production. Environmental Quality Management, 33(3), 223-238. doi: 10.1002/tqem.22116.

23. Beduk, F., Aydin, S., Ulvi, A., & Aydin, M. E. (2023). Persistent Organic Pollutants in Sewage Sludge: Occurrence, Temporal Concentration Variation and Risk Assessment for Sewage Sludge Amended Soils. KSCE Journal of Civil Engineering, 27(9), 3694-3704. doi: 10.1007/s12205-023-2385-x.

24. Wu, B., Wang, J., Hu, Z., Yuan, S., & Wang, W. (2020). Anaerobic biotransformation and potential impact of quinoline in an anaerobic methanogenic reactor treating synthetic coal gasification wastewater and response of microbial community. Journal of Hazardous Materials, 384, article number 121404. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121404.

25. Biogasgewinnung und -nutzung. Handreichung. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH. 3., überarbeitete Auflage, Gulzow, 2016. 232 p.

Підп. і дага
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дага
Інв.№подл.

26. Lin, Q., De Vrieze, J., Li, C., Li, J., Li, J., Yao, M., & Frouz, J. (2017). Temperature regulates deterministic processes and the succession of microbial interactions in anaerobic digestion process. *Water research*, 123, 134-143.

27. Mantovi, P., Fabbri, C., Soldano, M., & Piccinini, S. (2009). La separazione del digestato aumenta il potere fertilizzante. *L'informatore agrario*, 43, 55-58.

28. Martin, D. E., Alnajjar, P., Muselet, D., Soligot-Hognon, C., Kanso, H., Pacaud, S. & Feidt, C. (2023). Efficient biodegradation of the recalcitrant organochlorine pesticide chlordecone under methanogenic conditions. *Science of The Total Environment*, 903, article number 166345. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166345.

29. Kainthola, J., Podder, A., Fechner, M., & Goel, R. (2021). An overview of fungal pretreatment processes for anaerobic digestion: applications, bottlenecks and future needs. *Bioresource Technology*, 2021, 321, article number 124397. doi: 10.1016/j.biortech.2020.124397.

30. Kim, J. R., & Karthikeyan, K. G. (2021). Effects of severe pretreatment conditions and lignocellulose-derived furan byproducts on anaerobic digestion of dairy manure. *Bioresource Technology*, 340, article number 125632. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125632.

31. Kuszal M., Lorencowicz E. Agricultural use biogas degistate as replacement fertilizers. *Agricultural and Agricultural Science Procedia*. 2015. V. 7. P. 119–124.

32. Wu, L., Shen, Z., Zhou, Y., & Zuo, J. (2023). Stimulating anaerobic digestion to degrade recalcitrant organic pollutants: Potential role of conductive materials-led direct interspecies electron transfer. *Journal of Environmental Management*, 344, article number 118337. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118337.

33. Kim, J. R., & Karthikeyan, K. G. (2021). Effects of severe pretreatment conditions and lignocellulose-derived furan byproducts on anaerobic digestion of dairy manure. *Bioresource Technology*, 340, article number 125632. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125632.

34. Gong, W., Xie, B., Deng, S., Fan, Y., Tang, X., & Liang, H. (2019). Enhancement of anaerobic digestion effluent treatment by microalgae immobilization:

Підп. і дата	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дата	
Інв.№подл.	

Characterized by fluorescence excitation-emission matrix coupled with parallel factor analysis in the photobioreactor. *Science of the Total Environment*, 678, 105-113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.440.

35. Cavalli D., Cabassi G., Borrelli L. et al. Nitrogen fertilizer replacement value of undigested liquid cattle manure and digestates. *European J. of Agronomy*. 2016. V. 73. P. 34–41. doi: 10.1016/j.eja.2015.10.007

36. Riva C., Orzi V., Carozzi M. et al. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of The Total Environment*. 2016. V. 547. P. 206–214. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.156

37. Kumar S., Malav L.C., Malav M.K. et al. Biogas Slurry: Source of Nutrients for Eco-friendly Agricultural. *International J. of Extensive Research*. 2015. V. 2. P. 42–46.

38. Helias A., Brockmann D. Use of fertilizing residues by agricultural activities in LCA studies. *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector*. 2014. P. 523–532.

39. Alfa M.I., Adie D.B., Igboro S.B. et al. Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renewable Energy*. 2014. V. 63. P. 681–686. doi: 10.1016/j.renene.2013.09.049

40. Comparetti A., Febo P., Greco C. Current state and future of biogas and digestate production. *Bulgarian J. of Agricultural Science*. 2013. V. 19. № 1. P. 1–14.

41. Eickenscheidt T., Freibauer A., Heinichen J. et al. Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions affected by N availability from grasslands on drained fen peatlands and associated organic soil. *Biogeosciences*. 2014. V. 11. Is. P. 6187–6207. doi: 10.5194/bg-11-6187-2014 12.

42. Song T.A., Dragicevic I., Linjordet R. et al. Recycling of biogas digestates in plant production: NPK fertilizer value and risk of leaching. *International J. of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2018. V. 7. Is. 1. P. 49–58. doi: 10.1007/s40093-017-0188-0

Підп. і дага
Інв.№дубл.
Взаєм.інв.№
Підп. і дага
Інв.№подл.

					ОС 20510093		Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			51

43. Qi G., Pan Z., Sugawa Y. et al. Comparative fertilizer properties of digestates from mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of manure: focusing on plant growth promoting bacteria (PGPB) and environmental risk. *J. of Material Cycles and Waste Management*. 2018. № 20. Is. 3. P. 1448– 1457. doi: 10.1007/s10163-018-07087

44. Mukhuba M., Roopnarain A., Adeleke R. et al. Comparative assessment of bio-fertilizer quality of cow dung and anaerobic digestion effluent. *Cogent Food&Agriculture*. 2018. V. 4. P. 14–35.

45. Macadi M., Tomocsik A., Orocz V. Digestate: A New Nutrient Source – Review. *Biogas. Croatia: In Tech*, 2012. P. 295–310. doi: 10.5772/ 31355

46. Drouiche M.C., Moussaceb K., Joussein E., Bollinger J.C. “Stabilization/solidification by hydraulic binders of metal elements from landfill leachate”. *Nova Biotechnologica et Chimica*, no 18 (2019): 72–83.

47. Igoni, A. H., C. L. Eze, et al. , “(2005). Potentials of biogas generation from municipal solidwaste in the Port Harcourt metropolis,” in *Proc. 1st Annual Conference of Science and Technology Forum*, pp. 67 - 72., 2005.

48. Zhang, Y., C. J. Banks, et al., “Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams,” *Journal of Environmental Management* , vol. 104, pp. 166-174, 2012.

49. Mohamad Y.Mustafa, Rajnish K. Calay, E. Roman. *Biogas from Organic Waste - A Case Study*. *Procedia Engineering*. Volume 146, 2016, Pages 310-317.

50. Banks, C., M. Chesshire, et al., “Biocycle anaerobic digester: performance and benefits,” *Waste and Resource Management* , vol. 164, no. 1, pp. 141-150, 2011.

51. Xiao, Y., tian, Y., zhan, Y., & Zhu, J. (2023). Degradation of organic pollutants in flocculated liquid digestate using photocatalytic titanate nanofibers: Mechanism and response surface optimization. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, 10(3), 492-502. doi: 10.15302/J-FASE-2023503.

52. Petrovic M, de Alda MJ, Diaz-Cruz S, Postigo C, Radjenovic J, Gros M, Barcelo D. Fate and removal of pharmaceuticals and illicit drugs in conventional and membrane bioreactor wastewater treatment plants and by riverbank filtration. *Philos*

Підп. і дага	
Взаєм.інв.№	
Інв.№дубл.	
Підп. і дата	
Інв.№лодл.	

Trans A Math Phys Eng Sci. 2009 Oct 13;367(1904):3979–4003. doi: 10.1098/rsta.2009.0105.

53. Fick, Söderström, Lindberg, Phan, Tysklind, Larsson. Contamination of surface, ground, and drinking water from pharmaceutical production. Environ Toxicol Chem. 2009 Dec;28(12):2522–7. doi: 10.1897/09-073.1. Epub 2009 May 18.

54. Dr. Friederich Wirsing, Dr. Martin Sörensen: Beispiel der BASF AG, Elimination von EDTA aus Industrieabwasser durch UV-Oxidation; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 11-12-2004, p. 54– 55.

55. Sörensen, Martin: Photochemischer Abbau hydrophiler Syntheseprodukte im Hinblick auf die Wasseraufbereitung, Photochemical Degradation of hydrophilic xenobiotics with regard to water treatment. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) (1996).

56. Eckert V1, Bensmann H1, Zegenhagen F2, Weckenmann J2, Sörensen M2 . Haupt Pharma Münster GmbH1, Münster (Germany) und a.c.k. aqua concept GmbH2, Karlsruhe (Germany) Elimination of Hormones in Pharmaceutical Wastewater, pharm. ind. 2012 Nr. 03, Seite 487 (2012).

57. FAO. A new deal to rid Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia of obsolete pesticides. – 2012. <http://www.fao.org/news/story/en/item/134629/icode>. April 12, 2012.

58. Eqani, S.A., Malik, R.N., Cincineli, A., Zhang, G., Mohammad, A., Qadir, A., Rashid, A., Bokhari, H., Jones, K.C., Katsoyiannis, A. “Uptake of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) by river water fish: the case of River Chenab”. Science of the Total Environment. 450-451, (2013): 83-91.

59. Weber, R., Schlumpf, M., Nakano, T., Vijgen, J. “The need for better management and control of POPs stockpiles”. Environmental Science and Pollution Research. 22, no 19 (2015): 14385-14390

60. Khadra, A., Ezzariai, A., Merlina, G., Capdeville, M. J., Budzinski, H., Hamdi, H., & Hafidi, M. (2019). Fate of antibiotics present in a primary sludge of WWTP during

Підп. і дага	
Інв.№дубл.	
Взаєм.інв.№	
Підп. і дага	
Інв.№лодл.	

						OC 20510093	Арк
Вип	Арк	№ докум.	Підп.	Дата			53

their co-composting with palm wastes. Waste Management, 84, 13-19. doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.009.

61. White, P., Wolf, D., Thoma, G. and Reynolds, C. "Phytoremediation of alkylated polycyclic aromatic hydrocarbons in a crude oil-contaminated soil" Water, Air, and Soil Pollution. 169, no 1-4 (2006): 207-220.

62. T. Kupper, T.D. Bucheli, R.C. Brändli, D. Ortelli, P. Edder Dissipation of pesticides during composting and anaerobic digestion of source-separated organic waste at full-scale plants Bioresour. Technol., 99 (2008), p. 798817994, 10.1016/j.biortech.2008.03.052

63. Wang, G. Y., Ding, J., He, L., Wu, T., Ding, M. Q., Pang, J. W., & Yang, S. S. (2023). Enhanced anaerobic degradation of azo dyes by biofilms supported by novel functionalized carriers. Bioresource Technology, 378, article number 129013. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129013.

64. Anna Karlsson, Annika Björn, Sepehr Shakeri Yekta, Bo H. Svensson IMPROVEMENT OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS Explorative project (EP1), 2014. p.54.

65. Про пестициди і агрохімікати. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/86/95-вр#Text>.

Інв.№лодл.	Підп. і дата	Взаєм.інв.№	Інв.№дубл.	Підп. і дата

ОС 20510093

Арк

Вип Арк № докум. Підп. Дата

54