

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО**

**ФАКУЛЬТЕТ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я ТА СУСПІЛЬНОГО
БЛАГОПОЛУЧЧЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за ОС «Магістр»

**на тему: «АГРОЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ
ДИГЕСТАТУ, ЯК ОРГАНІЧНОГО ДОБРИВА НА ДЕГРАДОВАНИХ
ГРУНТАХ»**

Виконав: здобувач вищої освіти денної
форми навчання спеціальності 101 Екологія

БОЙКО МИРОН ІГОРОВИЧ

Керівник: к. с.-г. н., доцент

_____ **Ганна БУЦЯК**

Рецензент: д. с.-г. н, професор, завідувач
кафедри годівлі тварин і технології кормів

_____ **Ярослав ПІВТОРАК**

Львів 2025

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	13
1.1. Сучасний стан деградації ґрунтів, причини, наслідки	13
1.2. Безвідходні технології біоконверсії органічних відходів в органічне добриво та біогаз	17
1.2.1. Органічні відходи як базовий субстрат для анаеробного зброджування	18
1.3. Основні етапи технологічного процесу анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз та дигестат	20
1.4. Хімічний склад органо-мінерального органічного добрива – дигестату	24
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	30
2.1. Опис технологічного процесу одержання дигестату за метанового бродіння	30
2.2. Методика дослідження	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
3.1. Перспектива використання анаеробного дигестату як органо-мінерального добрива	35
3.1.1. Дослідження впливу дигестату як органічного добрива на хімічний склад ґрунту	38
3.1.2. Використання анаеробного дигестату як органо-мінерального добрива	48
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	53
РОЗДІЛ 5. ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ	57
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63
ДОДАТКИ	70

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота написана на 71 сторінках комп'ютерного тексту. Складається із 4 розділів, вступу, висновків, списку використаної літератури і додатків. Містить 22 рисунки, 14 таблиць, 57 джерел використаної літератури.

Ключові слова: деградовані ґрунти, органічне добриво, дигестат безвідходні технології біоконверсії органічних відходів, сільськогосподарські угіддя, врожайність, агроєкосистема.

Кваліфікаційна робота за ОС «Магістр» виконана на тему: “Агроєкологічна ефективність застосування дигестату, як органічного добрива на деградованих ґрунтах”, де розглянуті питання щодо відновлення родючості деградованих сільськогосподарських угідь різних форм власності.

В Україні понад 30% сільськогосподарських угідь піддаються ерозії, значна частина територій страждає від засолення та зниження вмісту гумусу. Це призводить до втрат врожайності та біорізноманіття, що робить відновлення ґрунтів стратегічним завданням для агросектору. Застосування дигестату як органічного добрива є одним із ключових елементів сучасних екологічно безпечних технологій у сільському господарстві. Його використання дозволяє підвищити родючість ґрунтів та знизити залежність від мінеральних добрив.

Особливої актуальності технологія використання анаеробного дигестату в землеробстві набуває в умовах сучасних викликів: глобальної енергетичної кризи, зростання вартості викопних палив, зміни клімату та необхідності скорочення викидів парникових газів. Для України, яка імпортує значні обсяги природного газу, біогазові установки можуть стати реальним інструментом зниження енергетичної залежності та забезпечення сталого розвитку аграрного сектору за рахунок зменшення використання мінеральних добрив.

Отримані результати власних досліджень підтверджують перспективність дигестату як інноваційного органічного добрива, яке одночасно покращує хімічний склад ґрунту, активує мікробіоту та прискорює гуміфікаційні процеси. Це відкриває нові можливості для відновлення

деградованих земель, підвищення продуктивності культур та підтримки сталого сільського господарства.

Мета роботи – оцінити агроекологічну ефективність застосування дигестату як органічного добрива для підвищення родючості деградованих ґрунтів та обґрунтувати доцільність його використання у сучасному землеробстві.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- провести аналіз складу дигестату, отриманого з різних біогазових установок, та визначити його поживну цінність;
- дослідити вплив різних доз дигестату на агрохімічні властивості деградованих ґрунтів (вміст гумусу, рН, забезпеченість NPK);
- оцінити вплив на урожайність та якість основних сільськогосподарських культур;
- розрахувати економічну та екологічну ефективність застосування дигестату порівняно з іншими органічними добривами;
- визначити потенційні ризики (санітарно-гігієнічні, екотоксикологічні) від його застосування та шляхи їх мінімізації.

Об'єкт дослідження: сільськогосподарські ґрунти з підвищеною ерозією та низьким вмістом гумусу західного регіону України.

Предмет дослідження: зміна агрохімічних і біологічних показників ґрунту та врожайності сільськогосподарських культур під впливом внесення дигестату.

Матеріали та методи. Для вирішення поставлених завдань кваліфікаційної роботи були використані класичні та сучасні методи дослідження. Дослідження проводилися на дослідних ділянках площею 10 м²

кожна, де було закладено контрольні та дослідні варіанти. Кожен варіант досліджувався у трьох повторностях для забезпечення статистичної достовірності результатів.

Визначення мікробної чисельності бактерій і грибів проводили методом серійного розведення та висіву на поживні середовища, Визначення активності ферментів – стандартні колориметричні методи, інтенсивність гуміфікації оцінювали за вмістом гумінових та фульвокислот методом кислотного та лужного екстрагування.

Наукова новизна. У роботі розглядається поєднання агрономічного та екологічного підходів до використання дигестату. Пропонуються оптимальні дози внесення з урахуванням типу деградації ґрунту. Підкреслюється роль дигестату як замітника частини мінеральних добрив, що знижує вуглецевий слід агровиробництва.

Практична значущість. Використання дигестату дозволяє зменшити собівартість вирощування культур та знизити залежність від дорогих мінеральних добрив. Рекомендації можуть бути впроваджені у фермерських господарствах, що мають доступ до біогазових комплексів, і сприятимуть відновленню родючості земель та поліпшенню екологічного стану агроландшафтів.

ANNOTATION

The qualification paper consists of 71 pages of computer-typed text. It includes 4 chapters, an introduction, conclusions, a list of references, and appendices. The paper contains 22 figures, 14 tables, and 57 bibliographic sources.

Keywords: *degraded soils, organic fertilizer, digestate, zero-waste bioconversion technologies, agricultural lands, crop yield, agroecosystem.*

The Master's qualification paper is devoted to the topic: "Agroecological Efficiency of Using Digestate as an Organic Fertilizer on Degraded Soils." The work explores the issues of restoring soil fertility on both degraded and conventional agricultural lands of various ownership forms.

In Ukraine, over 30% of agricultural lands are affected by erosion; a significant part of the territory suffers from salinization and a decrease in humus content. This leads to yield loss and biodiversity decline, making soil restoration a strategic priority for the agricultural sector. The use of digestate as an organic fertilizer is one of the key components of modern environmentally safe agricultural technologies. Its application improves soil fertility and reduces dependence on mineral fertilizers.

The technology of using anaerobic digestate in agriculture is becoming particularly relevant under current global challenges: the energy crisis, the rising cost of fossil fuels, climate change, and the need to reduce greenhouse gas emissions. For Ukraine, which imports large volumes of natural gas, biogas plants can become an effective tool to reduce energy dependence and ensure sustainable development of the agricultural sector by lowering the use of mineral fertilizers.

The obtained research results confirm the promising potential of digestate as an innovative organic fertilizer that simultaneously improves the chemical composition of the soil, activates microbiota, and accelerates humification processes. This opens

new opportunities for the restoration of degraded lands, increasing crop productivity, and supporting sustainable agriculture.

The aim of the study is to assess the agroecological efficiency of applying digestate as an organic fertilizer to improve the fertility of degraded soils and to justify its use in modern agricultural practices.

The following tasks were set to achieve the aim:

- to analyze the composition of digestate obtained from different biogas plants and determine its nutrient value;
- to investigate the effect of various digestate doses on the agrochemical properties of degraded soils (humus content, pH, and NPK availability);
- to evaluate its influence on the yield and quality of major agricultural crops;
- to calculate the economic and ecological efficiency of digestate application compared to other organic fertilizers;
- to identify potential risks (sanitary-hygienic and ecotoxicological) of its use and determine ways to minimize them.

Object of research: agricultural soils with increased erosion and low humus content in the western region of Ukraine.

Subject of research: changes in agrochemical and biological indicators of soil and crop yield under the influence of digestate application.

Materials and Methods. To achieve the objectives of this qualification paper, both classical and modern research methods were applied. The experiments were conducted on experimental plots of 10 m² each, which included both control and treatment variants. Each variant was tested in triplicate to ensure the statistical reliability of the results.

The microbial population of bacteria and fungi was determined using the serial dilution and plating method on nutrient media. The enzyme activity was measured using standard colorimetric methods, while the intensity of humification was evaluated based on the content of humic and fulvic acids, determined through acid and alkaline extraction techniques.

Scientific Novelty. This research combines agronomic and ecological approaches to the application of digestate. The paper proposes optimal application rates of digestate depending on the type of soil degradation. It emphasizes the role of digestate as a partial substitute for mineral fertilizers, which contributes to reducing the carbon footprint of agricultural production.

Practical Significance. The use of digestate makes it possible to reduce the cost of crop cultivation and decrease dependence on expensive mineral fertilizers. The recommendations developed in this study can be implemented by farms with access to biogas complexes, contributing to the restoration of soil fertility and improvement of the ecological condition of agricultural landscapes.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- Å – ангстрем,
АЗ – анаеробне зброджування;
ВМ – важкі метали;
Г – гумінові кислоти;
ЗІЗ – засоби індивідуального захисту;
ЄС – Європейський Союз;
ОР – органічна речовина;
СР – суха речовина;
ТУ У – технічні умови України;
Ф – фульфо кислоти.

ВСТУП

Сучасний агропромисловий комплекс України та світу загалом стикається з надзвичайно серйозними викликами, пов'язаними з деградацією ґрунтів, зниженням їх родючості та порушенням екологічної рівноваги. За даними ФАО, понад 33% сільськогосподарських угідь у світі піддаються процесам деградації, що призводить до втрати гумусу, зниження вмісту поживних речовин і погіршення структури ґрунту (ФАО, 2022).

В Україні ситуація не краща: майже 20% ріллі відносяться до категорії еродованих і деградованих, а показники гумусового стану за останні 30 років знизилися на 20–25% (Міністерство аграрної політики та продовольства України, 2023).

У цих умовах пошук ефективних, екологічно безпечних та економічно обґрунтованих рішень для відновлення родючості ґрунтів стає пріоритетним завданням агроєкології. Одним із перспективних напрямів є використання дигестату – органічного добрива, що є побічним продуктом анаеробного зброджування біомаси на біогазових установках (Lukehurst et al., 2020).

Дигестат містить широкий спектр поживних елементів, включаючи азот, фосфор, калій та мікроелементи, а також органічну речовину, яка сприяє покращенню фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Особливу увагу слід приділяти деградованим ґрунтам, які характеризуються низьким вмістом гумусу, зниженою водоутримувальною здатністю, ущільненістю та порушенням мікробіологічної активності (Кучеренко та ін., 2021).

Традиційні методи удобрення не завжди забезпечують комплексного відновлення таких ґрунтів, а надмірне використання мінеральних добрив може поглиблювати екологічні проблеми, спричиняючи закислення та вторинне засолення. Саме тому інтеграція органічних добрив нового покоління, зокрема дигестату, в систему удобрення є перспективним шляхом досягнення сталого землеробства [17].

Використання дигестату як органічного добрива має низку переваг:

1. Повернення органічної речовини у ґрунт – сприяє накопиченню гумусу, покращує структуру та аерацію ґрунту.
2. Збалансоване живлення рослин – поживні елементи у дигестаті перебувають у доступних формах, що підвищує коефіцієнт їх засвоєння рослинами (Holm-Nielsen et al., 2018).
3. Зниження антропогенного навантаження – утилізація відходів сільськогосподарського та харчового виробництва з одночасним виробництвом біогазу дозволяє скоротити викиди парникових газів і замкнути колообіг речовин у біосфері.
4. Економічна ефективність – зменшує витрати на придбання мінеральних добрив, забезпечує стабільність врожайності на довгостроковій перспективі.

Наукова новизна теми також полягає в тому, що сучасні дослідження акцентують увагу не лише на агрохімічних характеристиках дигестату, але й на його здатності впливати на біологічну активність ґрунтів, формування мікробних спільнот, а також на регуляцію викидів парникових газів з агроєкосистем (Bachmann et al., 2021). Це відкриває нові горизонти для міждисциплінарних досліджень, які поєднують ґрунтознавство, екологію, біотехнології та агрономію [21].

Водночас існують певні виклики. Серед них – необхідність стандартизації складу дигестату, визначення оптимальних доз та строків внесення для різних типів ґрунтів, оцінка його впливу на довкілля та агробіоценози.

Надмірне внесення або використання неякісного продукту може призвести до вторинного забруднення ґрунтів важкими металами або патогенними мікроорганізмами (Tambone et al., 2020). Саме тому важливо поєднувати агрохімічний моніторинг, санітарно-гігієнічні дослідження та екологічну експертизу при впровадженні цієї технології.

Таким чином, тема «Агроекологічна ефективність застосування дигестату як органічного добрива на деградованих ґрунтах» є надзвичайно актуальною як для теорії, так і для практики сучасного сільського господарства. Її розробка сприятиме формуванню нових моделей сталого землекористування, підвищенню продуктивності агроєкосистем, зменшенню залежності від синтетичних добрив і покращенню екологічного стану ґрунтового покриву [18].

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Сучасний стан деградації ґрунтів, причини, наслідки.

Деградовані ґрунти є одним з ключових факторів зниження продуктивності агроecosистем. Під терміном «деградація» розуміють погіршення фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунту під впливом природних та антропогенних чинників, що призводить до зниження його родючості та екологічних функцій (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Основні фактори, що з причинюють деградацію ґрунтів [1].

Тип	Головні фактори та наслідки
Біологічна	Зниження мікробної активності через руйнівні біохімічні процеси, передусім на полях, зменшує врожайність та робить землю менш придатною для обробітку сільськогосподарських культур
Хімічна	Несприятливі зміни у хімічному складі ґрунту (внаслідок використання синтетичних добрив, пестицидів тощо) погіршують живлення рослин. Через хімічну деградацію ґрунтів зменшується кількість корисних мікробів та знижується вміст гумусу, а також змінюється рН.
Екологічна	На продуктивність землі насамперед впливає зміна клімату (підвищення температури, екстремальні погодні явища тощо). Вирубання лісів також сприяє екологічній деградації викликаючи ерозію та порушуючи стабільність екосистем.
Фізична	Родючий шар ґрунту втрачається та виснажується внаслідок фізичного впливу повеней, поверхневих стоків, зсуву, вітрів, бурь, інтенсивної обробки полів, використання важкої техніки тощо. Тривала фізична деградація ґрунтів погіршує склад та структуру ґрунту, а отже, його родючість.

Ерозія ґрунтів. Ерозія є найпоширенішим типом деградації ґрунтів, охоплюючи понад 30% сільськогосподарських угідь України [2]. Водна ерозія проявляється у вигляді змиву верхнього родючого шару ґрунту, що містить основну частину гумусу та поживних елементів. За даними [3], середні втрати ґрунту внаслідок ерозійних процесів можуть досягати 15–25 т/га щорічно, що

еквівалентно втраті 300–400 кг гумусу. Вітрова ерозія, особливо в степових регіонах, призводить до утворення пилових бур, втрати дрібнозему та формування дефляційних западин.

Ерозія не лише зменшує запаси органічної речовини, але й негативно впливає на водно-фізичні властивості ґрунту, знижує його інфільтраційну здатність і провокує вторинне засолення на зрошуваних землях (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Шкода землеробству від ерозії ґрунтів [4].

Засолення ґрунтів. Засолення є другою за значущістю формою деградації орних земель. Воно виникає внаслідок накопичення легкорозчинних солей у ґрунтовому профілі, що зумовлює погіршення водопроникності, зниження біологічної активності та токсичний вплив на рослини. В Україні вторинне засолення найбільше поширене у південних областях, де поєднання зрошення та високих температур призводить до підняття рівня ґрунтових вод і міграції солей у кореневмісний шар (табл. 1.2).

За даними FAO [6], понад 20% зрошуваних земель світу вже зазнали негативного впливу засолення, що знижує врожайність основних культур на 15–50%. У наших умовах, засолення особливо небезпечне для посівів зернових

та овочевих культур, оскільки зменшує схожість насіння, уповільнює ріст і провокує фізіологічну посуху рослин.

Таблиця 1.2

Класифікація засолених ґрунтів за визначенням водонасиченої пасти [5].

Групування ґрунтів	ЕС, ммоль/см	Коефіцієнт адсорбції натрію (SAR)	Ступінь солонцюватості (ESP), %
незасолений несолонцюватий	<4	<13	<15
засолений несолонцюватий	>4	<13	<15
незасолений лужний (солонцюватий)	<4	>13	>15
засолений лужний (солонцюватий)	>4	>13	>15

Зниження вмісту гумусу. Вміст гумусу є інтегральним показником родючості ґрунтів. Середній рівень гумусу в чорноземах України за останні 100 років знизився з 6–7% до 3,2–3,5%, що є наслідком інтенсивного землеробства, порушення сівозмін та недостатнього внесення органічних добрив (рис. 1.2.).

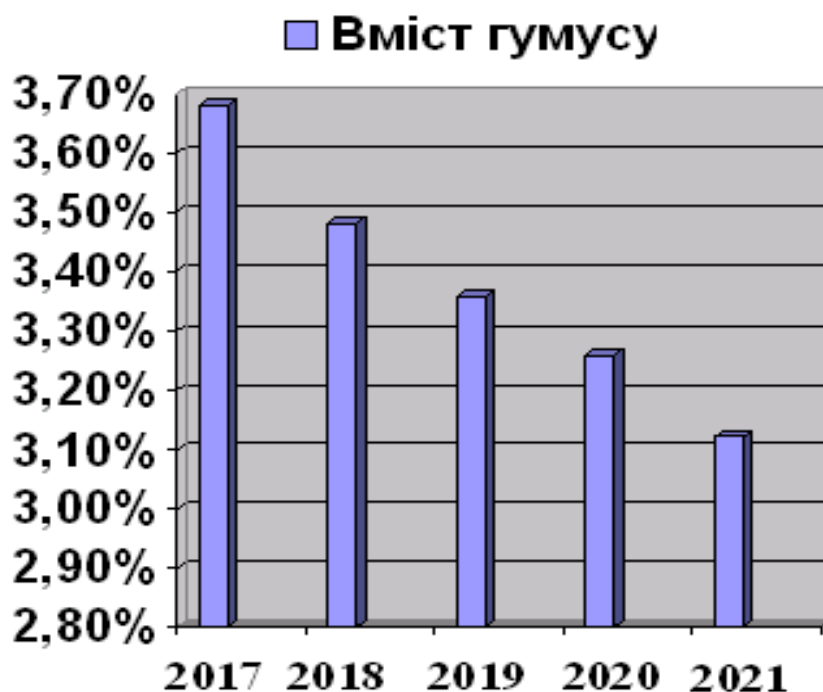


Рис. 1.2. Динаміка зміни вмісту гумусу в ґрунтах із 2017 по 2021 роки (усереднені дані по Україні) [7].

Дефіцит органічної речовини призводить до зменшення ємності катіонного обміну, погіршення структури ґрунту та зниження його здатності до акумуляції вологи. Науковці [19] підкреслюють, що відновлення гумусного стану є довготривалим процесом, який потребує систематичного внесення органічних добрив, сидератів та проведення заходів із запобігання ерозії.

Наразі тенденції щодо внесення в ґрунт органічних добрив щороку знижується (рис. 1.3) через зниження значної кількості поголів'я сільськогосподарських тварин, особливо, зараз через агресивні військові дії росії. Тому, необхідно шукати альтернативу органічним добривам і одним із таких перспективних органо-мінеральних компонентів є дигестат – побічний продукт безвідходної технології біоконверсії органічних відходів у біогаз.

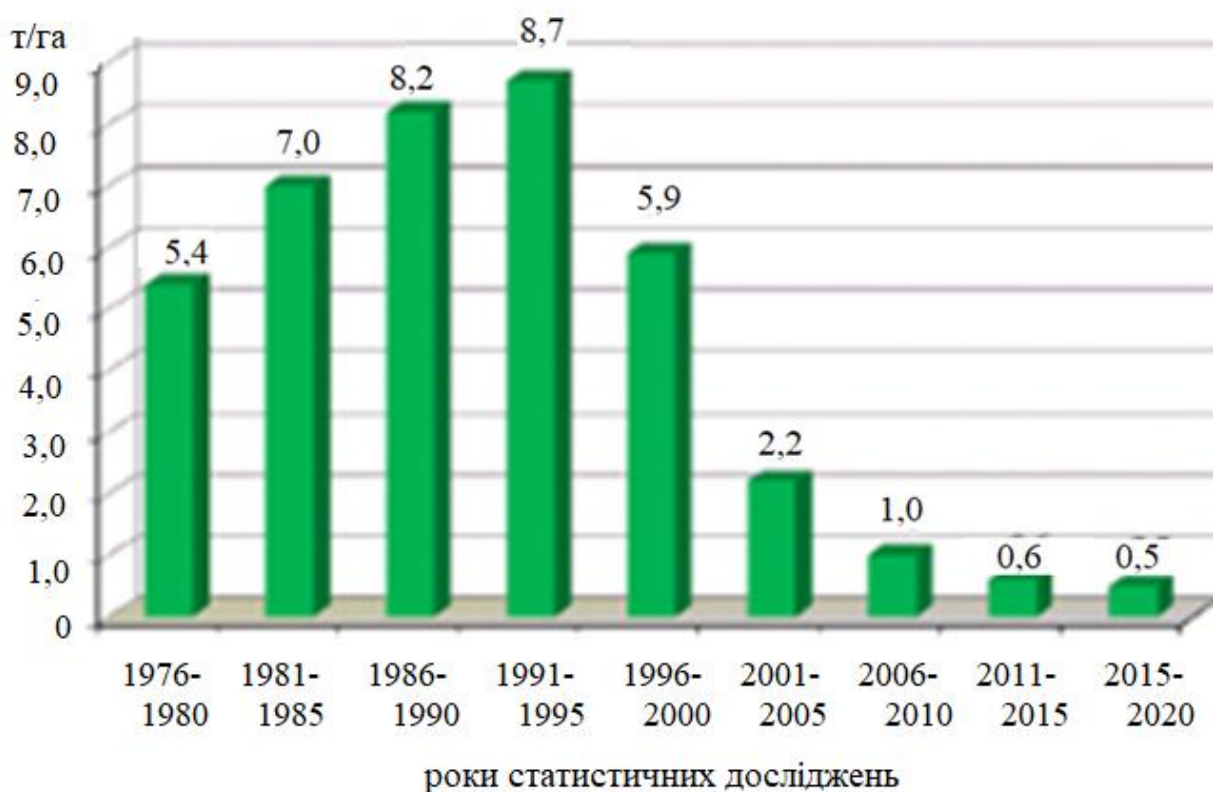


Рис. 1.3. Динаміка внесення в ґрунт органічних добрив упродовж 1976-2020 років

Дигестат як органо-мінеральне добриво має швидшу мінералізацію порівняно з компостом і гноєм, що забезпечує доступність поживних речовин для рослин вже в перший рік використання [4; 5; 10].

1.2. Безвідходні технології біоконверсії органічних відходів в органічне добриво та біогаз

Анаеробне зброджування (АЗ) органічних відходів сьогодні розглядають як одну з ключових технологій циркулярної економіки: вона поєднує переробку відходів у відновлюване джерело енергії (біогаз/біометан) та побічний продукт – дигестат як цінний органо-мінеральний компонент (рис. 1.4).

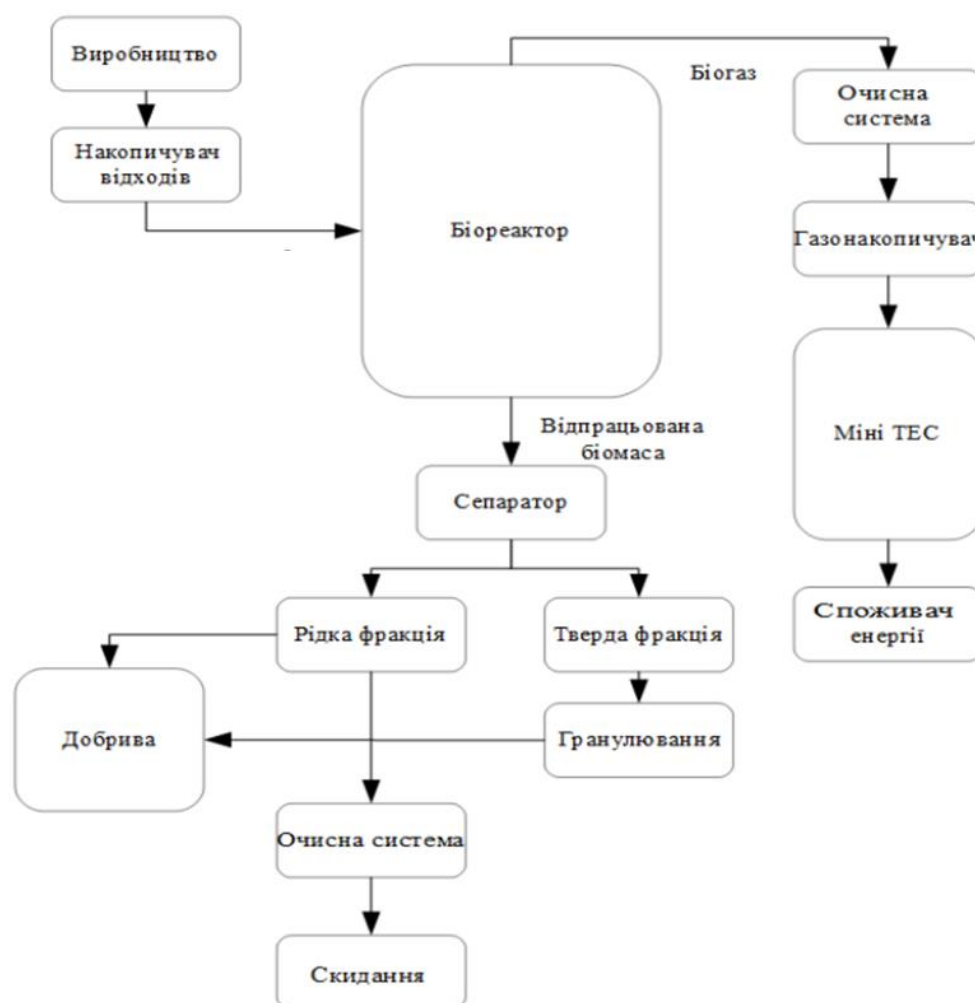


Рис. 1.4. Технологічна схема одержання дигестату шляхом анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз [20].

Міжнародні огляди й звіти підкреслюють, що секторальне розширення виробництва біогазу/біометану є одним із важливих інструментів декарбонізації енергетики й підвищення енергонезалежності; за сценаріями ІЕА, виробництво

біогазів має істотно зростати до 2030 р., а біометан може відігравати значну роль у заміщенні викопного газу.

Паралельно з енергетичними вигодами, передовий досвіт як зарубіжних, так й вітчизняних підприємців акцентується увагу на господарській цінності дигестату, як джерела органічної субстанції, поживних органічних та мінеральних елементів живлення рослин [24].

1.2.1. Органічні відходи як базовий субстрат для анаеробного зброджування

Органічні відходи можна поділити на кілька великих груп за походженням:

- сільськогосподарські відходи: гній та послід від тваринництва (свинарство, птахівництво, ВРХ); рослинні рештки (солома, стебла кукурудзи, відходи після переробки зерна, жому тощо);
- харчові відходи та відходи переробної промисловості: залишки харчових продуктів із домогосподарств, ресторанів, супермаркетів; відходи м'ясної та молочної промисловості (сироватка, кров, жир); відходи пивоваріння, цукроваріння, крохмале-патокowego виробництва;
- комунальні біовідходи: органічна фракція твердих побутових відходів; стічні води та мул стічних вод міських очисних споруд;
- специфічні біовідходи: залишки целюлозно-паперової промисловості; відходи харчових жирів та олій (зокрема використані кулінарні олії) (рис. 1.5).

Кожен тип сировини має свої переваги й недоліки для зброджування: гній є стабільним і добре збалансованим за вмістом мікроелементів, але дає відносно низький вихід біогазу; харчові відходи енергетично насичені, але можуть викликати закислення середовища.

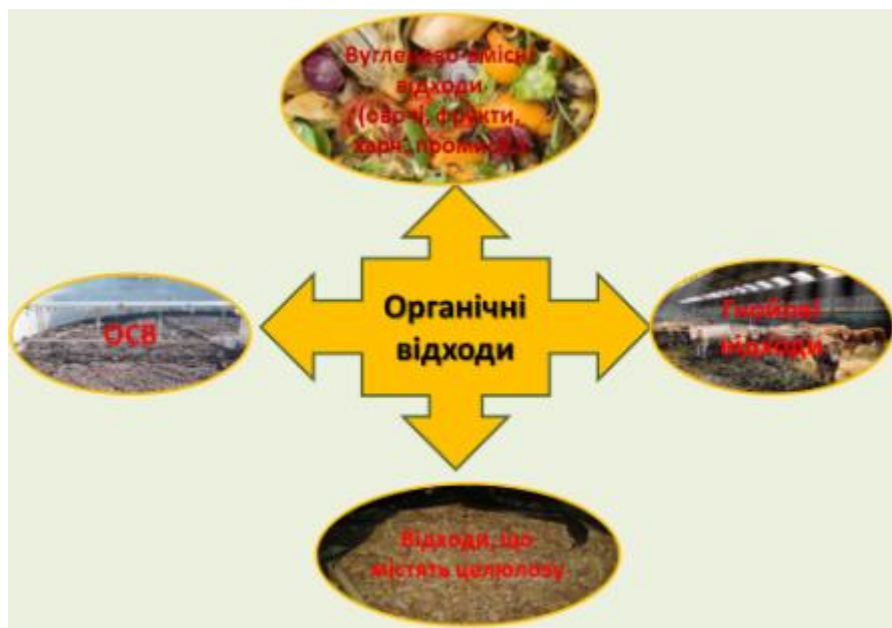


Рис. 1.5. Використання базових органічних відходів для одержання дигестату за анаеробного їх зброджування.

Сировина для АЗ складається переважно з трьох основних класів органічних сполук: вуглеводів (целюлоза, геміцелюлоза, крохмаль, цукри); білків; ліпідів (жирів).

Енергетичний потенціал залежить від вмісту цих компонентів: ліпіди мають найвищий потенціал (до 1014 л $\text{CH}_4/\text{кг}$ летких речовин); білки – середній потенціал (~ 496 л $\text{CH}_4/\text{кг}$); вуглеводи – нижчий (~ 415 л $\text{CH}_4/\text{кг}$).

Водночас надлишок білків може спричиняти інгібування процесу через утворення амоніаку, а надлишок жирів – накопичення довголанцюгових жирних кислот, які токсичні для метаногенних бактерій.

Оптимальний склад субстрату визначає стабільність процесу: співвідношення C:N є критично важливим. Для ефективного зброджування воно має бути в межах 20-30:1. При високому вмісті Нітрогену (низьке співвідношення C:N) накопичується амоніак, що інгібує метаногенів [25].

При надмірі вуглецю (високе співвідношення C:N) процес іде повільно через дефіцит азоту. Ко-бродіння (поєднання різних субстратів, наприклад, гній

+ харчові відходи + силос кукурудзи) дає змогу досягти оптимального балансу та підвищити вихід метану на 20-60%.

Дослідження практиків показують, що вихід біогазу за використанням органічних субстратів різного походження мають свої відмінності: гній ВРХ дає 200-250 м³ біогазу з тонни; кукурудзяний силос – 600-700 м³/т; харчові відходи – 400-600 м³/т; мул стічних вод – близько 250-350 м³/т.

Таким чином, правильний підбір і комбінування відходів визначає як економічну доцільність, так й стабільність процесу [26-28].

1.3. Основні етапи технологічного процесу анаеробного зброджування органічних відходів у біогаз та дигестат

Анаеробне зброджування (anaerobic digestion, AD) – це багатостадійний біохімічний процес, у якому складні органічні речовини під дією мікроорганізмів перетворюються у прості сполуки з утворенням біогазу (суміші метану й діоксиду вуглецю) та дигестату. Традиційно виділяють чотири основні етапи: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез, які взаємопов'язані та відбуваються одночасно, хоча й контролюються різними групами мікроорганізмів.

На першій стадії гідролізу – відбувається розщеплення складних полімерів (целюлоза, геміцелюлоза, білки, жири) на розчинні мономери. До ферментів, які беруть участь у цьому процесі, в основному, відносять: целюлази, протеази, ліпази тощо. Субстрати, які піддаються гідролізу – поліцукри до моноцукридів, білки – до амінокислот, ліпіди – до жирних кислот та гліцеролу.

Дана стадія анаеробного зброджування часто є «вузьким місцем» процесу, оскільки швидкість гідролізу визначає загальну продуктивність при використанні лігноцелюлозної біомаси.

У другій стадії на етапі ацидогенезу відбувається зброджування мономерів, утворених у процесі гідролізу, під дією кислотоутворюючих бактерій із утворенням летких жирних кислот (ацетатна, пропіонова, масляна), спиртів, водень (H_2), CO_2 , амоніак [29].

Накопичення кислот може спричинити зниження рН та інгібування подальших стадій, якщо немає адекватного буферного механізму (наприклад, присутності бікарбонатів або ко-бродіння з гноєм) (рис.1.6).

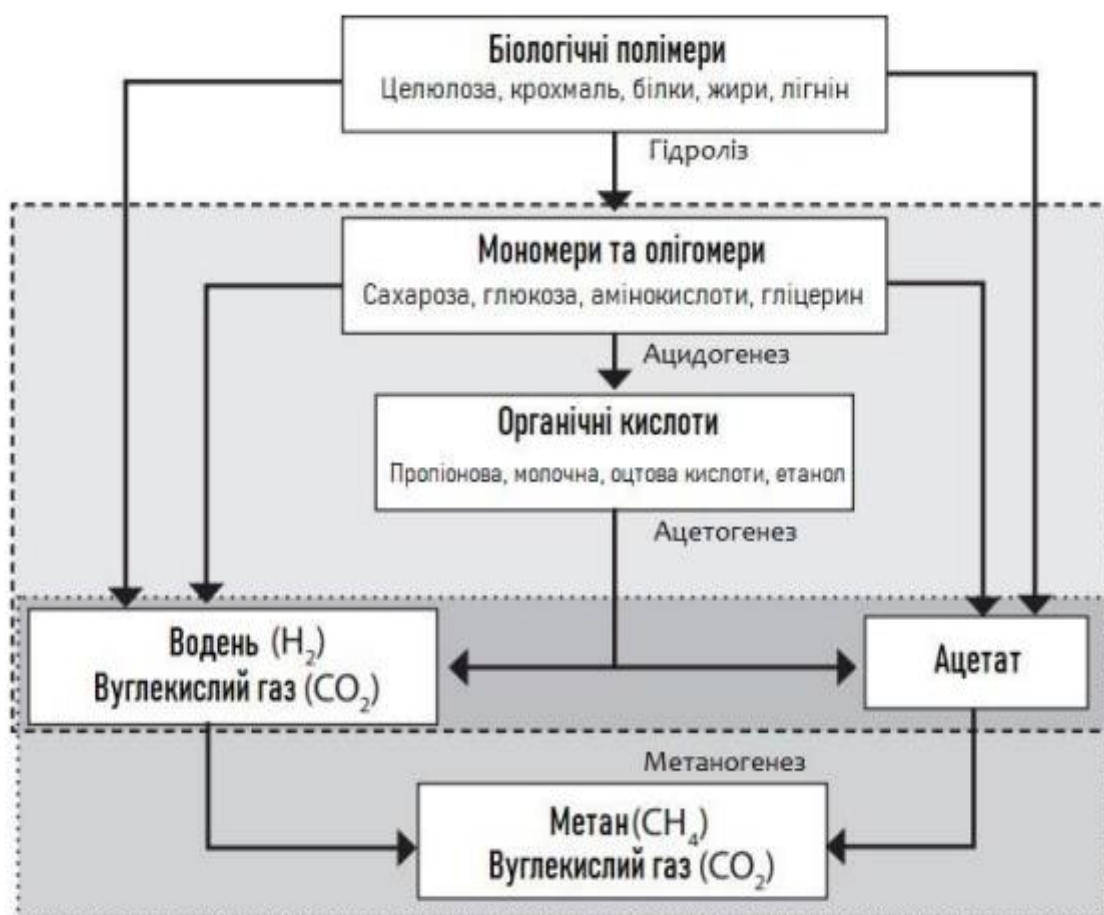


Рис. 1.6. Основні біохімічні процеси, які відбуваються за анаеробного зброджування органічних відходів [30].

На стадії ацетогенезу гідролізовані продукти перетворюються на ацетатну кислоту водень та вуглекислий газ. Синтрофні бактерії (sintrophic

bacteria) здійснюють розклад складніших летких жирних кислот, зокрема, пропіонатів, бутиратів тощо.

Даний процес можливий лише у тісній асоціації з метаногенами, які використовують водень, підтримуючи низьку його концентрацію та дозволяючи ацетогенам активно працювати. Дана стадія визначає баланс між виробництвом і споживанням водню, що є критичним для стабільності процесу.



Рис. 1.7. Основні технологічні етапи роботи метантенка для одержання дигестату та біогазу за анаеробного бродіння [31].

Усі стадії анаеробного зброджування здійснюються різними групами мікроорганізмів:

- Гідролітичні бактерії (*Clostridium*, *Bacteroides*) → розщеплюють полімери (целюлоза, крохмаль, білки, жири) на прості мономері.
- Ацидогенні бактерії (*Enterobacter*, *Lactobacillus*) → ферментують мономері у леткі жирні кислоти (ЛЖК), спирти, H_2 і CO_2 .

- Ацетогенні бактерії (*Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*) → перетворюють ЛЖК (пропіонат, бутират) у ацетат, H_2 і CO_2 .

- Метаногенні археї (*Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanosaeta*) → утворюють метан за допомогою ацетокластичного та гідрогенотрофного шляхів.

Ці консорціуми функціонують у синтрофії, тобто в тісній взаємодії: наприклад, ацетогени не можуть працювати без метаногенів, які споживають H_2 .

Фінальна стадія (метаногенез), у якій спеціалізовані метаногенні археї утворюють метан. Існують два основні шляхи: ацетокластичний метаногенез: $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$ (близько 70% метану утворюється саме цим шляхом); гідрогенотрофний метаногенез: $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$. Цей етап є найбільш чутливим до змін умов (рН, температура, токсичні речовини), але саме він визначає кінцевий вихід біогазу. Технологічний процес роботи біогазової установки наведено на рис. 1.7.

Для успішного анаеробного зброджування органічних відходів необхідно підтримувати оптимальні параметри середовища культивування: рН: оптимальний діапазон для метаногенів – 6,8-7,5; температура для мезофільного режиму – 30–38 °С (найпоширеніший, стабільний, менш енергозатратний температурний режим культивування); час зброджування субстрату за мезофільного режиму – 20–30 діб та вмісту сухої речовини на рівні 8–12%. [32-35].

1.4. Хімічний склад органо-мінерального органічного добрива – дигестату

Дигестат – це залишок органічної маси після процесу анаеробного зброджування, який містить комплекс органічних і мінеральних сполук, придатних для використання як органічне добриво. Він має вигляд рідкої або напівтвердої маси й є цінним побічним продуктом, що знаходить широке застосування в агросфері. Його хімічний склад залежить від виду сировини (гній, силос, харчові відходи) та технологічних параметрів біогазової установки [39].

Основними компонентами дигестату є суха органічна речовина та макроелементи – Нітроген (N), Фосфат (P_2O_5) та Калій (K_2O), які є ключовими елементами живлення рослин:

- Вміст сухої речовини (СР): зазвичай коливається від 6 до 12% для рідкого дигестату й 20–40% для твердого, органічна речовина у процесі зброджування розкладається частково, тому залишкова органіка становить 40–60% від початкової маси.
- Нітроген (N) у дигестаті представлений як у органічній, так й в мінеральній формах (NH_3^+), що робить його швидкодоступним для рослин, загальний вміст Нітрогену сягає 2–7% СР, зазвичай концентрація загального Нітрогену становить 3-8 кг/т [36].
- Фосфат (P_2O_5) міститься переважно у формі ортофосфатів, яка легко засвоюється рослинами. Вміст коливається у межах 1,5-3,5 кг/т [37].
- Калій (K_2O) у дигестаті знаходиться переважно в розчинній формі калійних солей, завдяки чому він швидко поглинається кореневою системою. Середній вміст – 4-6 кг/т [38].
- рН: зазвичай знаходиться в межах 7,0–8,5, що сприяє нейтралізації кислих ґрунтів.

Крім макроелементів, дигестат містить кальцій (Ca), магній (Mg) та Сульфур (S), що позитивно впливають на кислотно-лужний баланс ґрунтів.

Мікроелементи (В, Cu, Zn, Mn, Fe) також присутні в оптимальних концентраціях, що сприяє підвищенню біологічної активності ґрунту. За даними [40], дигестат здатний поповнювати 20–30% річної потреби культур у мікроелементах (табл. 1.3).

Таблиця 1.3.

Хімічний склад дигестату (середні значення)

Показник	Одиниця	Діапазон значень
Суха речовина	%	6–12
Органічна речовина	% СР	65–75
Загальний азот (N)	кг/т	3,0–8,0
Фосфор (P ₂ O ₅)	кг/т	1,5–3,5
Калій (K ₂ O)	кг/т	4,0–6,0
Кальцій (Ca)	кг/т	1,0–2,0
Магній (Mg)	кг/т	0,3–0,8
Мікроелементи (Cu, Zn, Mn)	мг/кг	5–50

(Джерела: [10–14])

Таким чином, дигестат є багатим на поживні елементи матеріалом, що за своїм складом може конкурувати з мінеральними добривами.

Органічна речовина дигестату має високу біологічну активність та містить гумінові й фульвокислоти, які сприяють формуванню агрегатної структури ґрунту, поліпшенню його вологоутримувальної здатності й стимуляції мікробіологічних процесів [54].

За рахунок високого вмісту мінеральних форм Нітрогену дигестат має швидку дію, подібну до мінеральних добрив, але на відміну від них він також збагачує ґрунт органічною речовиною, що робить його особливо цінним для деградованих ґрунтів.

Дигестат як кінцевий продукт анаеробного зброджування органічної сировини, який відрізняється високим ступенем стабільності, зниженою фітотоксичністю та більш доступною для рослин формою поживних речовин. Його порівняння з традиційними органічними добривами, такими як гній, компост і сидерати, є важливим для обґрунтування ефективності застосування у сільському господарстві.

По-перше, дигестат має значно вищий вміст легкодоступних форм Нітрогену (амонійний азот), тоді як у гної переважає органічно зв'язаний Нітроген, який потребує додаткової мінералізації перед засвоєнням рослинами [41]. Це забезпечує швидший старт росту культур у перші тижні після внесення дигестату.

По-друге, співвідношення C:N у дигестаті нижче, ніж у компості чи сидератах, що зменшує ризик іммобілізації азоту мікроорганізмами в ґрунті [42]. Компости, як правило, діють як довготривалі добрива, повільно вивільняючи елементи живлення, тоді як дигестат може діяти як швидкодіючий аналог орґано-мінерального добрива.

Сидерати забезпечують органічну речовину та сприяють поліпшенню структури ґрунту, але їхній вміст макроелементів часто нижчий, ніж у дигестаті. Крім того, сидерати потребують часу для вирощування та заорювання, що не завжди узгоджується з інтенсивними сівоzmінами.

Узагальнені дані про хімічний склад дигестату та традиційних органічних добрив наведено в табл. 1.4.

Дигестат має нижче співвідношення C:N, що забезпечує швидшу мінералізацію азоту. Нітроген у формі амонію є легкодоступним для рослин, що підвищує ефективність удобрення. Високий рН дигестату може сприяти нейтралізації слабокислих ґрунтів, але потребує врахування на лужних землях. Компост і сидерати краще впливають на структуру ґрунту, але діють повільніше.

Порівняльна характеристика хімічного складу дигестату, гною, компосту
рослинний та сидератів [43].

Показник	Дигестат	Гній великої рогатої худоби	Компост рослинний	Сидерати (зелена маса)
Суша речовина, %	6–10	18–22	35–50	15–20
Нітроген загальний (N), %	0,4–0,6	0,3–0,5	0,5–0,8	0,3–0,5
Фосфор (P_2O_5), %	0,25–0,35	0,2–0,3	0,3–0,4	0,2–0,3
Калій (K_2O), %	0,4–0,6	0,4–0,5	0,3–0,5	0,5–0,7
Співвідношення C:N	7–10	15–20	18–25	20–30
pH	7,5–8,2	6,5–7,2	6,5–7,0	6,0–6,5

Таким чином, використання дигестату дозволяє поєднати швидкодіючий ефект мінеральних добрив і властивості поліпшення родючості ґрунту, характерні для органічних матеріалів [36]. Він є перспективним компонентом інтегрованих систем удобрення, особливо на деградованих ґрунтах, де необхідно одночасно підвищувати вміст гумусу і забезпечувати швидкий ріст культур (рис. 1.8).

Застосування дигестату як органічного добрива не лише збагачує ґрунт поживними речовинами, але й суттєво впливає на його мікробіологічну активність. Біологічні процеси, що відбуваються в ґрунті після внесення дигестату, тісно пов'язані з розвитком сапротрофних, азотфіксуючих та фосфатмобілізуєчих мікроорганізмів, які є головними рушіями гуміфікації та мінералізації органічної речовини [44].

Дигестат містить легкодоступні для мікробіоти сполуки Нітрогену, Карбону та мікроелементи. Це призводить до підвищення кількості бактерій і грибів у ґрунті на 20–40% порівняно з контролем [44], активізації

нітрифікаційних та амоніфікаційних процесів, що забезпечує швидке перетворення органічного Нітрогену в доступні для рослин форми.



Рис. 1.8. Ефективність використання дигестату як органо-мінерального добрива [7]

Створюються умови для інтенсивного зростання чисельності популяцій бактерій, таких як *Azotobacter* spp., *Bacillus* spp. та *Pseudomonas* spp., які покращують структуру ґрунту та його аерацію.

Поряд із цим відбувається посилення процесів гуміфікації ґрунтів (процес перетворення свіжої органічної речовини на гумусові речовини, що є основою родючості ґрунту) завдяки високому вмісту органічного Карбону в дигестаті, при цьому швидкість утворення гумінових кислот зростає на 15–30% порівняно з використанням традиційного гною [45].

Гумінові та фульвокислоти, що формуються, стабілізують структуру ґрунту, підвищують його вологоємність і здатність до утримання поживних елементів. Внесення дигестату зменшує мінералізацію гумусу у деградованих ґрунтах, що особливо важливо для запобігання подальшого зниження їх родючості.

Після анаеробного зброджування більшість патогенних мікроорганізмів (сальмонели, кишкова паличка, яйця гельмінтів) значно знижується або повністю елімінуються, особливо при термофільному режимі та насіння бур'янів. Проте у деяких випадках можливе часткове збереження патогенів, що вимагає проведення додаткової гігієнізації (пастеризація, компостування). У складі дигестату залишаються активні мікробні консорціуми, які можуть позитивно впливати на ґрунтову мікрофлору, покращуючи мінералізацію органіки. Це створює санітарно безпечні умови для розвитку корисної мікрофлори після внесення у ґрунт.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Опис технологічного процесу одержання дигестату за метанового бродіння



ТП 5 Кг	Збирання рідкої фракції
CP=6 %, W=94 %	

ТП 6 Кг, Кх	Підготовка біогазу та його зберігання
----------------	---------------------------------------

ТП 6.1 Кг	Збір біогазу
P=3-3,5kPa	

ТП 6.2 Кг	Осушка біогазу
P=3-3,5kPa	

ТП 6.3 Кг, Кх	Очищення від сірководню
P=3-3,5kPa	

ТП 6.4 Кг	Спалювання біогазу на факелі
P=3,7kPa	

ТП 7 Кг	Одержання електроенергії та тепла з біогазу
------------	---

ПМВ 8 Кг	Пакування, маркування, відвантаження
-------------	--------------------------------------

ПМВ 8.1 Кг	Тверда фракція
V=120 л, дата пакування	

ПМВ 8.2 Кг	Рідка фракція
V=1 м³, дата пакування	

ПВ 9 Кг	Поводження з відходами
------------	------------------------

ПВ 9.1 Кг	Зберігання фільтрів та передача на утилізацію
--------------	---

ПВ 9.2 Кг	Очищення повітря
--------------	------------------

2.2. Методика досліджень

Об'єктом дослідження були ґрунти з низьким вмістом гумусу, розташовані в межах науково-дослідного господарства “Комарнівський” Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З.Гжицького. Ґрунти характеризувалися кислим рН 5,5–6,0, низьким вмістом органічної речовини (1,2–1,8%) та обмеженим рівнем доступних макроелементів.

Дослідження проводилися як в лабораторних умовах, так й на дослідних ділянках площею 10 м² кожна, де було закладено контрольні та дослідні ділянки із різними варіантами удобрення:

- контроль ділянка – без внесення органічних добрив;
- дослідна ділянка 1 із внесенням у ґрунт дигестату у кількості 10 т/га.
- дослідна ділянка 2 із внесення гною 20 т/га.
- дослідна ділянка 3 із внесення компосту 15 т/га.
- дослідна ділянка 4 із заорювання зеленої маси сидератів у ґрунт.

Кожен варіант досліджувався у трьох повторностях для забезпечення статистичної достовірності результатів.

Матеріали:

- дигестат – отриманий після анаеробного зброджування суміші гною великої рогатої худоби та рослинних відходів у біогазовій установці ТзВ “БІТ” (директор Філіппов С.І.) (рис.2.1).



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд одержаного дигестату твердої фракції



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд рідкої фракції дигестату

- гній – свіжий гній великої рогатої худоби, витриманий 1 місяць.
- компост – компост із рослинних залишків, витриманий 6 місяців.
- сидерати – зелена маса гороху, люцерни та гірчиці.

Інструменти та обладнання: лопати, пробовідбірники ґрунту, лабораторні прилади для визначення хімічного складу та мікробіологічної активності ґрунту.

Основні фізико-хімічні властивості ґрунту та органічних добрив визначали наступними методами:

- вологість ґрунту досліджували класичним методом висушування в сушильній шафі при 105°C , по закінченню висушування, математичним методом визначали вологість, як різницю між масами до та після висушування;
- органічну речовину, яка містилася в ґрунті визначали за методом Ван-Соест шляхом прожарювання зразків обезводненого ґрунту в муфельній печі за температури біля 450°C , з наступним обрахунком органічної речовини, як різниці маси до прожарювання та після цієї процедури [15].
- Нітроген (N) визначали методом К'ельдалем шляхом нагрівання зразку із концентрованою сульфатною кислотою в присутності незначної кількості сульфату купруму як каталізатора із утворенням сульфату амоніаку. Після цього створюють лужне середовище і відганяють амоніак, який ттрують стандартним розчином хлоридної кислоти. За кількість поглинутого амоніаку визначають вміст Нітрогену.

- Фосфор (P_2O_5) і калій (K_2O) визначали за ДСТУ 4405-2005 Якість ґрунту. Визначення рухомих сполук фосфору та калію за методом Кірсанова у модифікації ННЦ ІГА.

- Вміст гумусу в зразках ґрунтів визначали за класичним методом Тюріна І.В.

- рН ґрунту – потенціометрично у водній суспензії (1:2,5).

Мікробіологічними методами визначали: мікробну чисельність бактерій і грибів – методом серійного розведення та висіву на поживні середовища [16]; активність ферментів (уреаза, фосфатаза) – стандартними колориметричними методами та інтенсивність гуміфікації оцінювали за вмістом гумінових та фульвокислот методом кислотного та лужного екстрагування.

Одержані експериментальні дані обробляли методом середніх значень та стандартного відхилення.

Запропоновані методики дозволяють комплексно оцінити вплив дигестату на хімічні, фізичні та біологічні властивості деградованих ґрунтів, порівняно з традиційними органічними добривами та сидератами.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Перспектива використання анаеробного дигестату як органо-мінерального добрива

Анаеробне зброджування поєднує в собі два важливі результати (рис. 3.1): утворення біогазу, який може використовуватися для виробництва теплової та електричної енергії або як заміник природного газу, та отримання дигестату – органо-мінерального добрива з високою агрохімічною цінністю. Це робить технологію унікальним прикладом циркулярної економіки, де відходи стають сировиною, а кінцевий продукт – ресурсом для сільського господарства та енергетики.

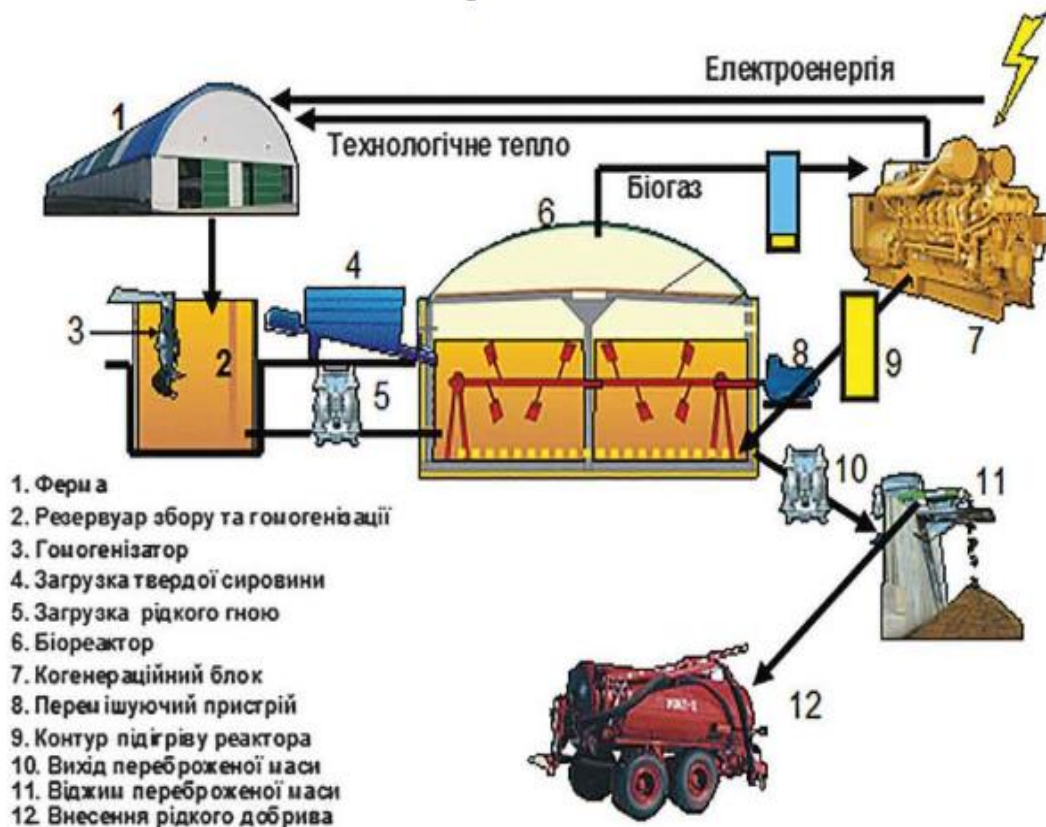


Рис.3.1. Технологічний процес безвідходного використання кінцевих продуктів анаеробного зброджування біогазу та дигестату

Ефективність анаеробного зброджування органічних відходів значною мірою залежить від оптимізації технологічних параметрів та властивостей

сировини. Правильна організація процесу дозволяє не лише підвищити вихід біогазу, але й забезпечити стабільність роботи установки та покращити якість дигестату.

Дигестат, що утворюється після процесу зброджування, є цінним орґано-мінеральним продуктом. До цього складу входять сполуки Нітрогену, фосфору, калію, мікроелементи та органічна речовина, які роблять його ефективним добривом, порівняно із сирым гноєм чи компостом, він має стабілізований склад. Дигестат широко використовується зарубіжними країнами, особливо, країнами ЄС як складовий компонент для органічного землеробства (рис. 3.2).

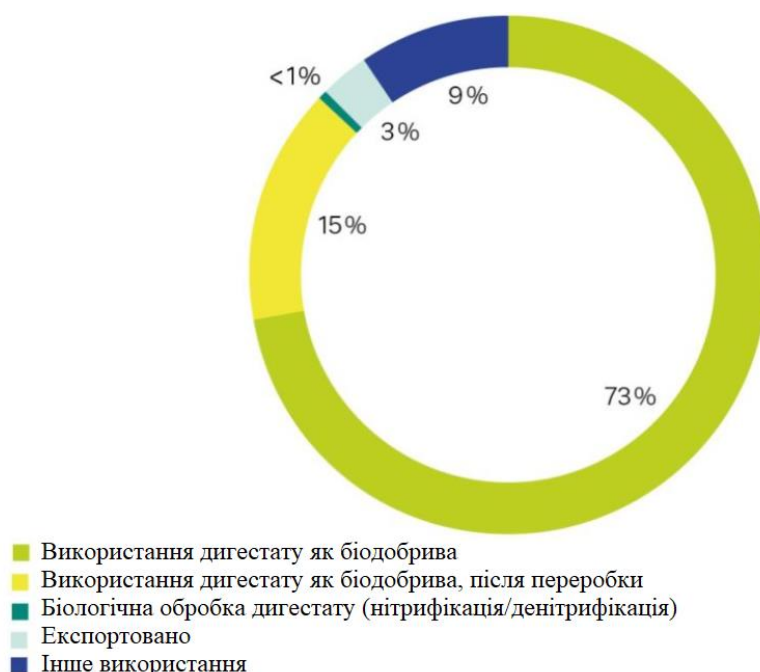


Рис. 3.2. Динаміка використання різних форм дигестату в ЄС

Світові тенденції підтримуються політичними ініціативами зі сприяння використання дигестату як орґано-мінерального добрива; водночас локальні умови (логістика, структура фермерства, інвестиції) визначатимуть темпи його впровадження в конкретних країнах. Для подальших досліджень і прикладних впроваджень необхідні комплексні пілотні проекти, довгострокові моніторинги й стандартизація кінцевих продуктів анаеробного зброджування, зокрема,

дигестату. Однак, враховуючи аналітичні дослідження, використання анаеробного дигестату має енергетичний, економічний, екологічний та соціальний ефект (рис. 3.3).

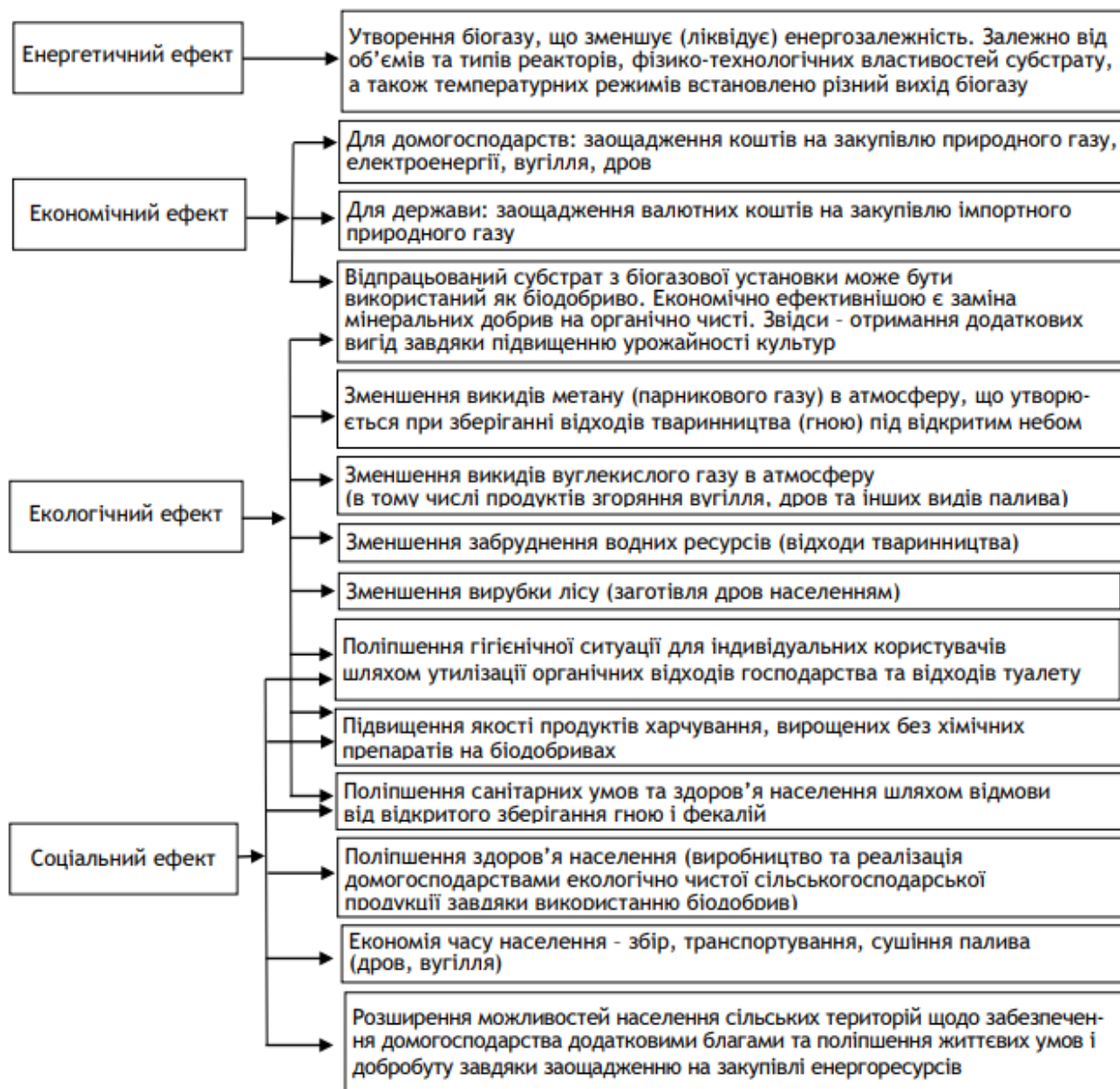


Рис. 3.3. Доцільність використання цільових продуктів (біогаз та дигестат) анаеробного ферментації органічних відходів

Попри існуючі проблеми, перспективи розвитку біоконверсійних технологій в Україні є надзвичайно високими. Біогазові комплекси можуть стати основою для формування агроенергетичних кластерів, де всі відходи

будуть перетворюватися на енергію та добрива. Це дозволить створити замкнуті цикли виробництва, що є основою циркулярної економіки.

На даний час, Верховна Рада України розглянула законопроект за №4558 “Про поводження з пестицидами і агрохімікатами” та його позитивно ухвалила, де дигестат, який утворюється при анаеробному зброджуванні віднесено до органічного добрива, яке не потребує державної реєстрації. Це сприятиме широкому використанню дигестату як органічного добрива та на ринку виступати як конкретний товар.

Розглянутий документ зазначає, що дигестат є побічним продуктом анаеробного зброджування органічних відходів тваринного чи рослинного походження або в їх поєднанні з утворенням біогазу. Одержаний дигестат відповідає регламентним нормам запровадженими Регламентом (ЄС) 2019/1009 Європарламенту від 05. 06 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 [53].

3.1.1. Дослідження впливу дигестату як органічного добрива на хімічний склад ґрунту

Враховуючи вище наведені дані щодо якісних характеристик дигестату як органо-мінерального добрива, нами були проведені порівняльні дослідження впливу різних видів добрив, які класично використовуються в землеробстві на хімічний склад ґрунту після їх використання (табл.. 3.1).

У контрольну ділянку не вносили органічних добрив; у дослідну ділянку 1 – вносили у ґрунт дигестат у кількості 10 т/га; у дослідну ділянку 2 – вносили у ґрунт гній ВРХ у кількості 20 т/га; у дослідну ділянку 3 – вносили у

грунт компосту кількості 15 т/га та у дослідну ділянку 4 у грунт заорювали зелену масу сидератів

Таблиця 3.1

Динаміка поживних речовин ґрунту після використання дигестату, гною, компосту та сидератів як органічного добрива

Варіант	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	Органічна речовина (%)	Гумінові речовини (%)
Контроль	0,06	0,02	0,03	1,3	0,6
Дигестат	0,13	0,05	0,06	1,8	1,0
Гній	0,10	0,04	0,05	1,7	0,9
Компост	0,09	0,04	0,05	1,7	0,9
Сидерати	0,08	0,03	0,04	1,6	0,8

Після використання дигестату як органічного добрива впродовж одного вегетаційного сезону, порівняно із внесенням інших видів добрив, спостерігалось суттєве покращення показників родючості ґрунтів. Органічна речовина в зразках ґрунту на даній дослідницькій ділянці була найвищою і переважала як решту дослідних зразків та контроль на 6,6–45,0%. Це підтверджує дані літератури [47, 49], де зазначено, що дигестат є висококонцентрованим джерелом поживних речовин та органічної маси.

Вміст доступного для рослин Нітрогену в ґрунтах зріс на 23,1, 30,8 та 38,5% відповідно порівняно із використанням як органічного добрива гною ВРХ, компосту та сидератів. Аналогічно підвищилася концентрація рухомих форм фосфору та калію в перерахунку на (P₂O₅) та K₂O на 10–15 % порівняно із іншими видами добрив та контролю, забезпечує кращу засвоюваність елементів рослинами, що сприяє підвищенню продуктивності культур.

Поряд із цим, нами спостерігалось при використанні дигестату як органічного добрива підвищення на 0,3–0,5 одиниць рН ґрунту, це позитивно вплинуло на кислотність досліджуваних ґрунтів, що сприяє активізації мікробіологічних процесів.

Враховуючи позитивний вплив дигестату як органо-мінерального добрива на основні поживні компоненти для рослин в ґрунті стало доцільним дослідити його макро- та мікроелементний склад (табл.3.2).

Таблиця 3.2

Вміст окремих макро- та мікроелементів в анаеробному дигестаті

Елементи	Вміст у дигестаті
Кальцій, г/кг	0,45
Магній, г/кг	0,22
Нікел, мг/кг	0,42
Хром, мг/кг	0,46
Купрум, мг/кг	0,58
Марганець, мг/кг	3,12
Ферум, мг/кг	68,9

Як видно із наведеної таблиці, в анаеробному дигестаті міститься значна кількість макро- і мікроелементів, в тому числі й біогенних, які безпосередньо входять до складу біологічно активних речовин, і можуть активно впливати як на біохімічні процеси мікроорганізмів резосфери так й на рослинний організм в цілому.

Таблиця 3.3

Динаміка вмісту групового складу гумусу залежно від внесеного органічного добрива в ґрунт

Зразки ґрунту	Глибина відбору зразків	Гумус, %	Вміст у гумусі, %		Відношення Г : Ф
			Гумінові кислоти, %	Фульфо-кислоти, %	
Контроль	0-15 см	1,82	24	48	0,50
Дигестат	0-15 см	2,88	32	52	0,61
Гній	0-15 см	2,16	27	50	0,54
Компост	0-15 см	2,22	29	54	0,53
Сидерати	0-15 см	2,18	25	52	0,48

У зразках ґрунтів, де як органічне добриво використовували дигестат вміст гумусу збільшився на 1,06%, вміст гумінових кислот в ньому зріс на 33,3%, а фульвокислот – на 8,3% порівняно з контролем, де не використовували жодного із органічних добрив. Відношення гумінових кислот до фульвокислот зросло на 0,11, що вказує на зниження фульватизації гумусу та покращення його якісних показників, а саме сприяло поліпшенню структури ґрунту, підвищенню вологоємності та здатності утримувати поживні речовини.

Гній, сидерати та компост також підвищували вміст гумусу в середньому на 0,34-0,40%, але темпи утворення були значно повільнішими, ніж у випадку використання дигестату. Поряд із цим, використання таких органічних добрив сприяє подальшій фульватизації гумусу через збільшення кількості «агресивних» фульвокислот, особливо, коли застосовували сидерати як органічне добриво.

Мікробіологічний аналіз показав, що використання дигестат на дослідних ділянках як органічного добрива стимулює зростання популяцій бактерій і грибів на 30–40% порівняно з контролем, і як, наслідок, сприяє більш ефективному розщепленню органічних сполук та мінералізації поживних для рослин речовин безпосередньо в ґрунті.

Враховуючи вище наведені експериментальні дослідження та літературних даних, можна зробити наступне заключення щодо ефективності використання вибраних нами органічних добрив:

- дигестат – найбільш ефективний для швидкого відновлення родючості ґрунтів за рахунок доступного Нітрогену та активної мікрофлори, забезпечує одночасно покращення хімічного складу та біологічної активності ґрунту;

- гній – ефективний для довгострокового підтримання родючості, але менш швидкодіючий, повільніше вивільнює Нітроген, потребує доволі значного часу для досягнення стабільного ефекту;

- компост – сприяє стабілізації гумусу та поліпшенню структури ґрунту та довготривало підтримує родючість, однак потребує більше часу для досягнення результату;

- сидерати – впливають на органічну масу ґрунту, однак проявляють обмежений вплив на макроеlementи, ефект проявляється поступово, особливо у випадку короткострокових досліджень.

Таким чином, результати підтверджують, що дигестат є перспективним органічним добривом для відновлення родючості ґрунтів, здатним швидко покращувати їх хімічний та біологічний потенціал.

Дигестат складається із залишків збродженого матеріалу та мертвих клітин мікроорганізмів, причому об'єм дигестату коливається близько 90-95% того, що спочатку було подано в ємкість (біогазову станцію)

Отже, дигестат є не лише відходом, а й важливим продуктом біогазових технологій, який може повністю замінити, особливо, коли мова заходить про органічне землеробство або суттєво доповнити традиційні мінеральні добрива (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Порівняльна характеристика дигестату та мінеральних добрив

Параметр	Дигестат	Мінеральні добрива
Доступність поживних речовин	Помірна	Висока
Вплив на ґрунт	Покращує структуру ґрунту, мікробіоту	Часто деградує ґрунт
Ціна	Низька (особливо при локальному використанні)	Висока
Екологічність	Висока (утилізація відходів)	Помірна/низька
Вуглецевий слід	Низький	Високий (через виробництво)
Вплив на довкілля	Не спостерігається	Закислення та забруднення ВМ ґрунтів.

Використання дигестату замість мінеральних добрив знижує викиди N_2O з ґрунту та дозволяє скорочувати витрати аграрних підприємств і знижувати антропогенне навантаження на довкілля.

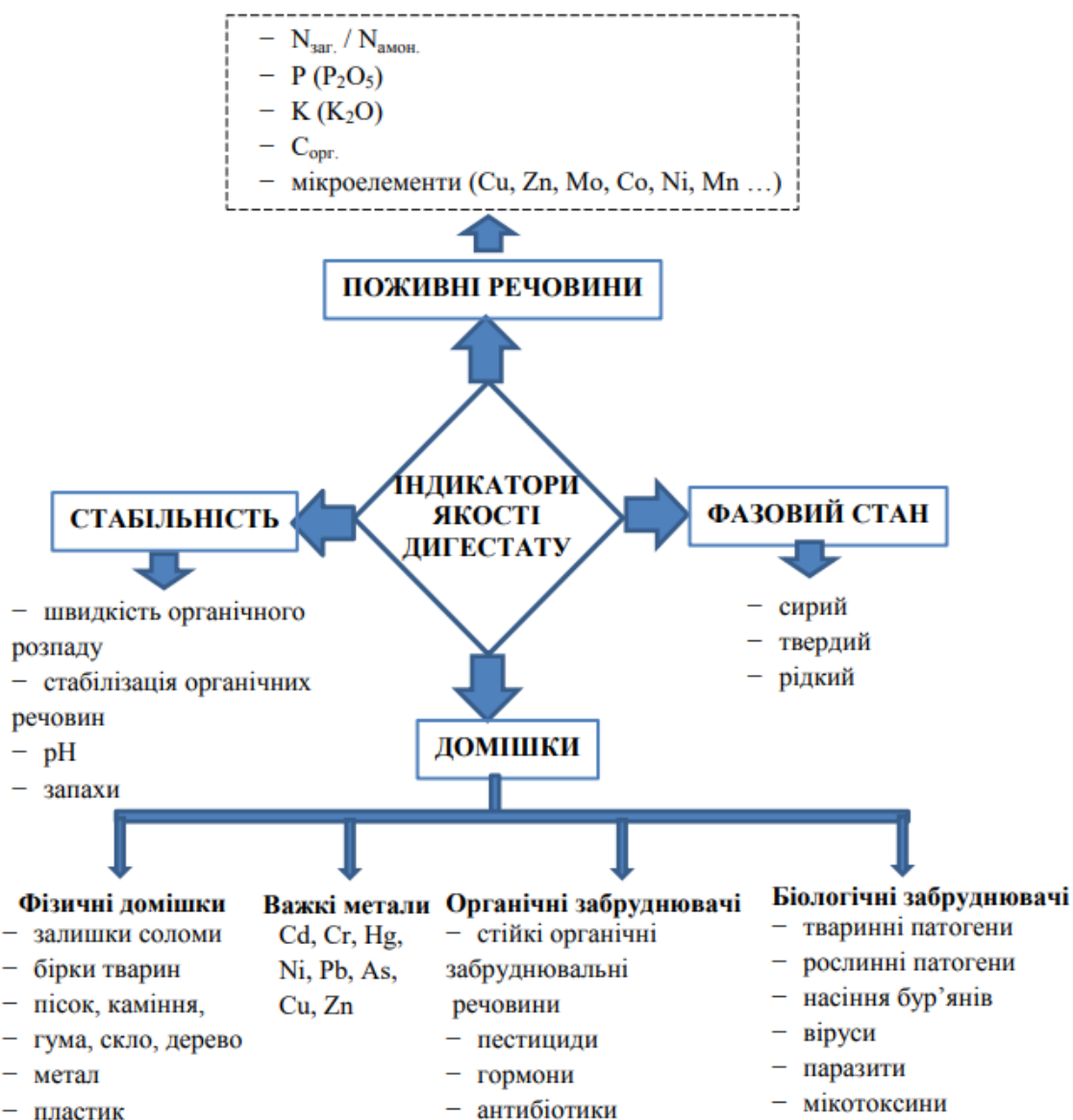


Рис. 3.4. Характеристика якісних показників дигестату, одержаного в процесі мезофільного анаеробного зброджування органічних відходів

Дигестат широко використовується у сільському господарстві як органо-мінеральне добриво завдяки своїм властивостям (рис. 3.4):

- висока доступність азоту: до 50–70% у формі NH_4^+ , що забезпечує швидке живлення рослин, довготривала дія: органічні сполуки, що залишились, поступово мінералізуються, забезпечуючи пролонгований ефект;

- поліпшення структури ґрунту: внесення дигестату знижує щільність ґрунту, підвищує його вологоутримувальну здатність, збагачення макро- і мікроелементами: Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn.

Його використання сприяє підвищенню родючості ґрунтів, зниженню витрат на агротехніку та реалізації принципів циркулярної економіки за безвідходною технологією.

Таблиця 3.5

Методи додаткової обробки фракцій дигестату одержаного при анаеробній ферментації органічних відходів

Методи	Суть методу	Використання
Концентрування	Сушіння та гранулювання твердої фракції	Розширення можливості комерціалізації. Зниження витрат на транспортування та внесення
	Випарювання рідкої фракції	Зменшення до 50% об'єму рідкого дигестату. Зниження витрат на транспортування та внесення
	Фільтрація рідкої фракції	Концентрування дигестату в рідкій формі. Зниження витрат на транспортування та внесення.
Виділення окремих сполук	Віддувка амоніаку з рідкої фракції (парою, повітрям)	Зниження вмісту Нітрогену в дигестаті в процесі внесення його в ґрунт або подальшому зброджуванні. Похідним продуктом є сульфат амонію або амоніачна вода
	Осадження струвіту ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$) після фільтрації	Виробництво аналогу синтетичного магнезійового-амонієво-фосфатних добрив.
	Адсорбція/гранулювання у рідкій фракції	Виробництво концентрованого препарату з рідкої фракції – гранульованого органічного добрива пролонгованої дії

Перед внесенням дигестату в ґрунт методом поливу чи зрошування у вигляді крапель рідку фракцію дигестату, чи поверхнево для заорювання тверду

фазу дигестату (табл. 3.6) рекомендують методи додаткової обробки (рис. 3.5), що значно підвищують ефективність дигестату як органічного добрива і стабільність його щодо зберігання та логістики.

Таблиця 3.6

Способи застосування дигестату

Форма	Спосіб використання	Пояснення
Рідкий дигестат	Через краплинне зрошення, внесення під корінь, ферментація	Миттєва доступність поживних речовин
Тверда фракція	Компостування, внесення в міжряддя, мульчування	Довготривала дія, поліпшення структури ґрунту
Гранулювання	Сушіння і пресування для отримання гранульованих добрив	Зручно для транспорту і зберігання

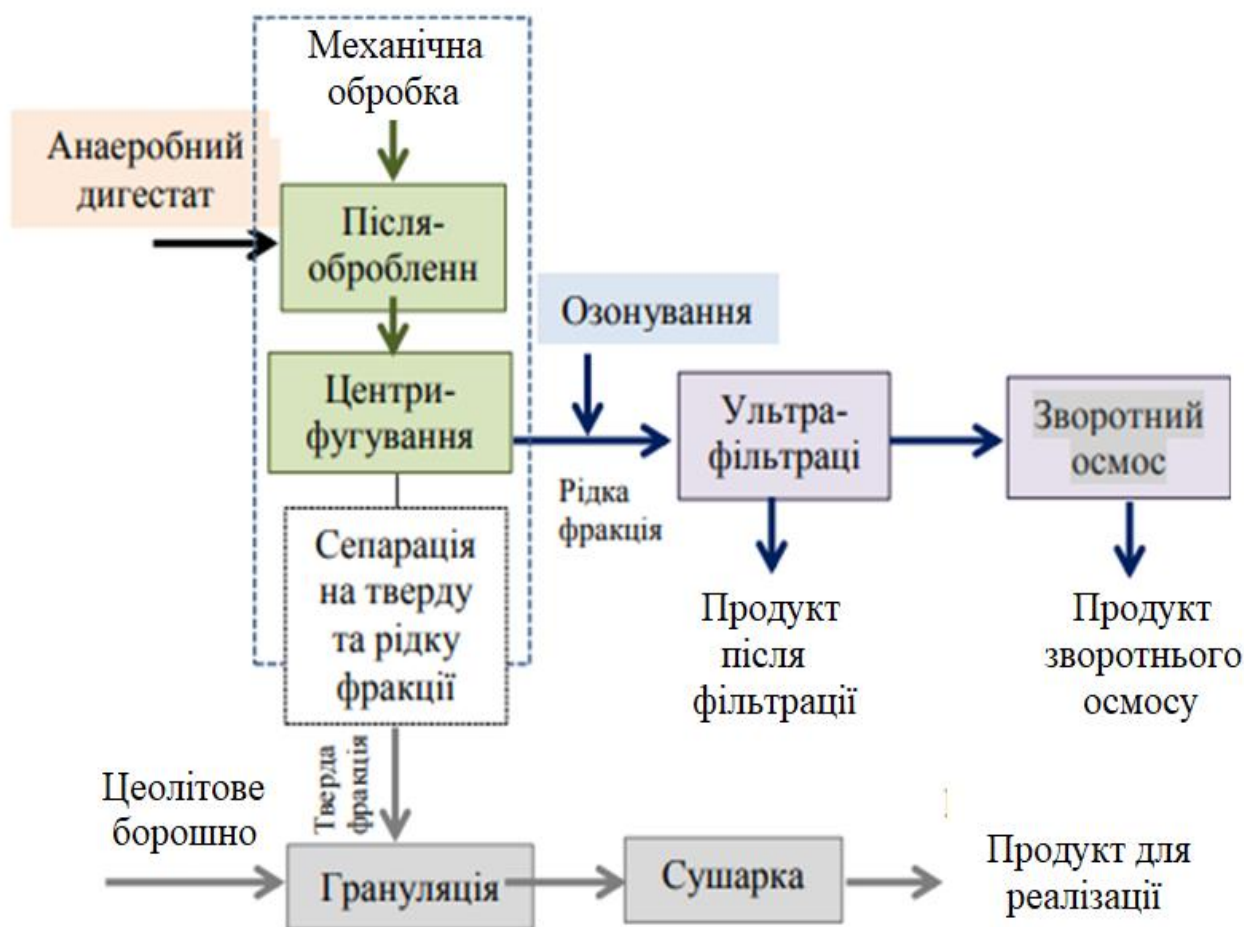


Рис. 3.5. Технологічний процес гранулювання анаеробного дигестату (органічного добрива)

Окрім цього використовують інноваційні технології, які перетворюють анаеробний дигестат за мезофільного режиму культивування у високоякісне органічне добриво. Технологія цього процесу зводиться до механічної обробки (гомогенізації), центрифугування з наступним сушінням, грануляції із використанням цеолітового борошна, яке забезпечує збагачення мікроелементами, а це дозволить отримувати концентровані органо-мінеральні продукти (органічне добриво), придатні до транспортування й експорту. Сертифікований дигестат може позиціонуватися як органічне добриво на міжнародному ринку.

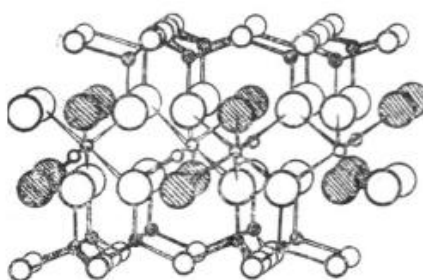


Рис.3.6. Схематична структура цеолітового борошна

Таблиця 3.7

Хімічна характеристика цеоліту Сокирницького родовища [52]

Хімічні сполуки та елементи	<i>Сорт А</i>	<i>Сорт Б</i>	<i>Сорт В</i>
Вміст цеоліту в породі, %	71-85	59-62	60-65
Вологість, %	4,6	4,7	3,2
SiO ₂ , %	70,9	72,1	69,9
Al ₂ O ₃ , %	13,1	12,3	14,3
CaO, %	3,4	3,0	3,0
K ₂ O, %	2,6	2,1	1,9
MgO, %	0,7	1,2	1,0
FeO, Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , Na ₂ O, P ₂ O ₅ , %	0,01-0,68	0,02-0,65	0,02-1,05
Cd, мкг/кг	< 5	< 5	< 5
Hg, мкг/кг	< 1	< 1	< 1
Pb, мкг/кг	1	0	1
Zn, мкг/кг	28,9	не визначали	не визначали

Використане цеолітове борошно (ТУУ 20432977 001-95) – це туфи вулканічного походження (алюмогідросилікатами лужних і лужно-земельних металів), в структуру якого входять велика кількість пор розміром від 2,0 до 8,0 Å, де міститься значна кількість макро- і мікроелементів у йонообмінній формі, яка доступна для рослин.

Поряд із цим цеоліти мають властивості адсорбувати токсичні елементи, зокрема, важкі метали, токсичні гази молекули води тощо (рис. 3.6). Хімічна характеристика різних сортів цеолітового борошна Сокирницького родовища, яке використовувалося в процесі гранулювання дигестату [51] наведена в табл.3.7.

3.1.2. Використання анаеробного дигестату як органо-мінерального добрива

Лабораторні дослідження щодо вивчення впливу дигестату як органо-мінерального добрива, одержаного в процесі анаеробної мезофільної ферментації на активність проростання зерна пшениці проводились за методиками розробленими Інститутом еволюційної екології НАН України [48] (рис. 3.7).

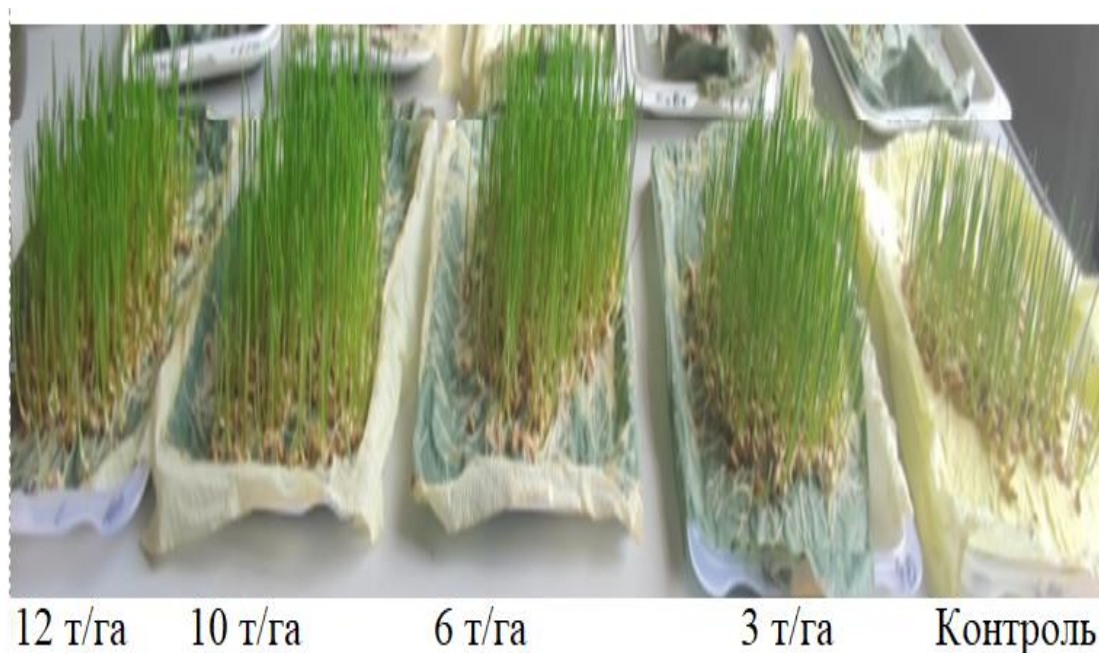


Рис. 3.7. Лабораторні дослідження динаміки впливу дигестату на активність проростання зерна пшениці залежно від його кількості

Для проведення експериментальних досліджень було сформовано одну контрольну та чотири дослідних зразків. До розчинів солей основних елементів живлення для рослин (К, Р та N) контрольного зразку не додавали анаеробного дигестату, а у дослідні зразки додавали дигестат як органічне добриво у відповідних дозах в перерахунку – 3, 6, 10 та 12 т/га.

В лабораторних умовах впродовж 14 діб підтримували комфортні умови вирощування, контролювали температурний режим, режим освітлення, який

відповідає активному росту рослин та сліdkували за зволоженістю посівного матеріалу.

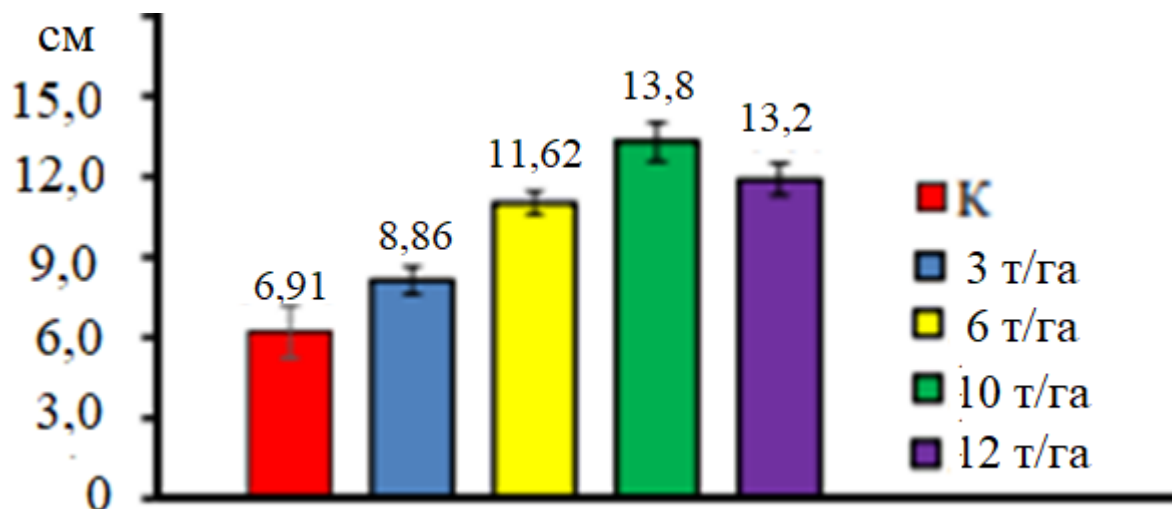


Рис. 3.7. Динаміка проростання проростків пшениці озимої залежно від дози внесеного анаеробного дигестату на 14 добу експерименту

Як видно із наведеного рисунку, в лабораторних експериментальних умовах, найактивніше проростали паростки пшениці третьому дослідному зразку, де їх додатково підживляли анаеробним дигестаном в дозі 10 т/га. За таких умов, проростки пшениці даного варіанту дослідів переважали як контроль, так й інші дослідні зразки (1, 2 та 4-тий) відповідно на 49,9, 35,8, 15,8 та 4,4%.

Враховуючи результати лабораторних досліджень, ми вважаємо за доцільним використовувати анаеробний дигестат твердої фракції як компонент органічного добрива у дозі 10 т/га. З цією метою ми провели польові дослідження на дослідних ділянках розміром 10 м², де на дослідну ділянку вносили анаеробний дигестат в розрахунку 10 т/га, а на нічого не вносили (рис. 3.8).

Як видно із рис. 3.8, під впливом органо-мінерального добрива – дигестату відбувається активації енергії росту досліджуваних рослин пшениці.

На 5 добу польових досліджень розмір рослин дослідної ділянки перевищував аналогів із контрольної ділянки на 54,5%, а на 20 добу – відповідно на 59,3%.

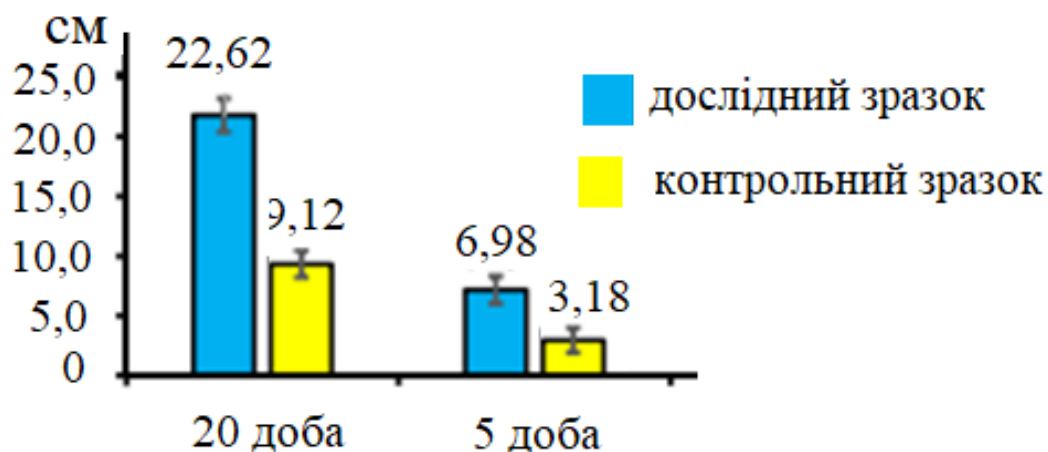


Рис. 3.8. Динаміка росту паростків пшениці на 5 та 20 добу вирощування залежно від внесеного органічного добрива – анаеробного дигестату

Поряд із цим, нами, проведено дослідження агрохімічного складу ґрунту, у який, додатково, було внесено органо-мінеральне добриво – дигестат у дозі 10 т/га (табл.3.8).

Таблиця 3.8

Агрохімічний склад ґрунту залежно від внесеного дигестату одержаного за анаеробної ферментації базового субстрату (мг/кг)

Фракція	pH	N заг.	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Zn	Cu
Контроль	5,82	16,4	78,2	105,6	886,4	65,4	8,4	2,46	0,16
Тверда (10,0 т/г)	6,46	108,4	142,4	210,3	1010	98,2	17,2	4,4	0,32
± з контролем	+0,64	+92,0	+64,2	+104,7	+123,6	+32,8	+8,8	+1,94	+0,16

Як видно із наведеної таблиці, анаеробний дигестат як компонент органічного добрива сприяє зростанню врожайності та поліпшенню фізико-хімічних властивостей ґрунту та його поживної для рослин цінності, а це призводить до відновлення родючості як деградованих, так й звичайних виснажених ґрунтів.

Отримані нами експериментальні результати досліджень узгоджуються з дослідженнями Möller & Müller [22] і Alburquerque et al. [23], де показано, що дигестат є ефективним органічним добривом для відновлення та підвищення родючості ґрунтів.

Дигестат як орґано-мінеральне добриво може розглядатися як повноцінна альтернатива мінеральним добривам [50]. У системі сталого землеробства дигестат є ключовим компонентом циркулярної економіки, зменшуючи навантаження на довкілля.

Таким чином, анаеробне зброджування органічних відходів – це не лише технологія майбутнього, а й невід’ємний елемент сучасної стратегії переходу до економіки замкненого циклу та енергетичної незалежності.

Усе це підтверджує, що дослідження агроекологічної ефективності дигестату є науково обґрунтованим, практично значущим і своєчасним завданням, результати якого матимуть безпосередній вплив на формування екологічно безпечного та продуктивного агропромислового виробництва.

На основі лабораторних і польових досліджень, а також враховуючи аналітичні пропозиції провідних фахівців в даній галузі [45, 46] нами, обґрунтований SWOT-аналіз (табл.3.9), який забезпечить обґрунтовано із економічних, екологічних та соціальних засад враховувати сильні і слабкі сторону, можливості і загрози запровадження органічного землеробства на основі використання безвідходних, екологічно орієнтованих технологій анаеробного збродження органічних віходів за мезофільної ферментації у біогаз та органічне добриво з високими якісними характеристиками.

**SWOT – аналіз виробництва та використання дигестату як кінцевого продукту
анаеробного зброджування органічних відходів**

Сильні сторони	Слабкі сторони
Містить органічний Карбон у складі гумінових речовин (1-3% по масі) та необхідні для рослин макро- та мікроелементів (N, P, K, Mg, S тощо). Підвищує врожайність с.-г. культур, порівняно з мінеральними добривами за рахунок доступного для рослин Нітрогену. Забезпечує оптимальне для ґрунту співвідношення C/N 20-30 та pH 6,8-7,5 Немає насіння бур'янів та патогенної мікрофлори, кількість синергічних популяцій мікроорганізмів достатньо висока, яка сприяє активному росту рослин і відновлення родючості деградованих ґрунтів. Сприяє зниженню щільності та підвищенню вологоємності ґрунтів	Більшість біогазових підприємств в Україні, орієнтовані на продаж електроенергії за «зеленим» тарифом, а дигестат на ринку як органічного добрива не розглядається. Відсутність державних норм та вимог щодо виробництва та використання органічних добрив загалом, і дигестату зокрема. Відсутність системи сертифікації та забезпечення якості дигестату, що гальмує створення ринку органічних добрив з дигестату. Відсутність можливості створення іміджу якісного органічного добрива, відсутність довіри серед потенційних споживачів та, відповідно, попиту.
Можливості	Загрози
Як альтернатива дорогим імпортованим добривам; Для реабілітації деградованих ґрунтів у зонах військових дій; Для створення замкнутих агроєкосистем на базі ферм, комбінатів, агропідприємств; Для біоорганічного землеробства – особливо у сегменті органічного виробництва. Як потенціал для скорочення викидів парникових газів (до 6 кг CO₂ на 1 кг заміщених азотних добрив)	Можливе перенасичення ґрунту азотом – потребує агрономічного розрахунку доз. Наявність патогенів або залишкових мікрополітантів – особливо якщо сировиною є харчові та побутові відходи. Неприємний запах – при поверхневому внесенні (вирішується закладенням у ґрунт або компостуванням). Потреба в спеціалізованій техніці для зберігання та внесення.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Закон України «Про охорону праці» визначає охорону праці як систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя та здоров'я працівників.

Аграрний сектор є основою економіки України та водночас сферою, що характеризується підвищеним рівнем виробничих ризиків. Робота в сільському господарстві пов'язана із використанням складної техніки, контактами з тваринами, хімічними та біологічними речовинами, високими фізичними навантаженнями. Окрему категорію ризиків становить функціонування біогазових установок, які базуються на анаеробному зброджуванні органічних відходів.

Впровадження таких технологій в агросфері має очевидні переваги – зменшення обсягів відходів, отримання відновлюваної енергії та цінного добрива (дигестату). Проте біогазові комплекси є джерелом підвищеної небезпеки, оскільки в процесі експлуатації виникають загрози вибухів, пожеж, витоків токсичних газів та біологічного зараження. Тому питання охорони праці та цивільного захисту набуває особливого значення

Безпечні умови праці є невід'ємною частиною будь-яких агроекологічних досліджень, включаючи застосування дигестату на деградованих ґрунтах. Дотримання вимог охорони праці не лише захищає працівників від шкідливих факторів, а й забезпечує коректність експериментальних даних та екологічну безпеку довкілля [56].

У сільському господарстві найчастіше зустрічаються такі групи небезпек як механічні – робота з тракторами, комбайнами, транспортерами, мішалками; фізичні – шум, вібрація, перепади температур, електричний струм; хімічні – вплив аміаку, метану, сірководню, добрив та пестицидів; біологічні – патогенні мікроорганізми у відходах; психофізіологічні – стрес, втому, нерегламентований робочий час.

ОСНОВНІ ШКІДЛИВІ ТА НЕБЕЗПЕЧНІ ФАКТОРИ ПРИ РОБОТІ З ДИГЕСТАТОМ



Рис. 4.1. Фактори, які виникають при роботі із дигестатом

При роботі з дигестатом необхідно враховувати такі потенційні небезпеки:

- біологічні фактори: можливість потрапляння в організм патогенних мікроорганізмів або продуктів їх метаболізму;
- хімічні фактори: наявність аміаку, летких жирних кислот, підвищена концентрація N та P, що можуть призвести до подразнення слизових оболонок [9];
- фізичні фактори: ризики травмування під час роботи з насосами, ємностями для зберігання та транспортування дигестату;
- психофізіологічні фактори: підвищене нервово-емоційне навантаження під час польових дослідів та роботи з великою кількістю даних.

Для мінімізації впливу небезпечних факторів персонал повинен використовувати:

- гумові рукавички та чоботи;
- захисні окуляри або щитки для очей;
- комбінезони з водонепроникного матеріалу;
- респиратори для запобігання вдиханню амоніаку та пилу.

Таблиця 4.1

Регламентовані ЗІЗ в процесі роботи з дигестатом

Вид робіт	Обов'язкові ЗІЗ	Додаткові заходи безпеки
Відбір проб дигестату	Рукавички, респіратор, окуляри	Робота на відкритому повітрі
Внесення на поле	Чоботи, комбінезон, респіратор	Супровід тракторного агрегату лише підготовленим персоналом
Чистка ємностей	Повний комплект ЗІЗ + респіратор	Попередня дегазація ємностей

Необхідно також дотримуватися необхідних заходів (рис. 4.2):



Рис. 4.2. Схема дії персоналу впродовж аварії [57].

- організаційних заходів – інструктаж персоналу з техніки безпеки перед початком дослідів; регулярна перевірка обладнання (насосів, шлангів, транспортних ємностей); чітке маркування зон зберігання дигестату та обмежений доступ до них, обмеження доступу сторонніх осіб до газонебезпечних зон; журнал реєстрації перевірок обладнання та регулярні навчання діям у разі аварій [57];

- інженерно-технічних заходів – обладнання системами газоаналізу та сигналізації; автоматичні клапани та відсікачі газу; резервні системи живлення; вентиляція приміщень із газонебезпечним обладнанням;

- медичні заходи – попередні та періодичні медичні огляди працівників; вакцинація проти зоонозних інфекцій; забезпечення аптечками першої допомоги.

Дотримання вимог охорони праці також знижує екологічні ризики:

- запобігає потраплянню дигестату у водні об'єкти при його розливі;
- мінімізує забруднення повітря аміаком;
- підтримує санітарні норми у виробничих приміщеннях [56].

РОЗДІЛ 5. ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

Цивільний захист на підприємствах аграрного сектору проводиться згідно регламентним документам, а саме: Законом України «Про охорону праці» (1992, зі змінами), Законом України «Про цивільний захист населення» (2004), Державними санітарними правилами для роботи з небезпечними газами, Європейськими стандарти безпеки EN 16258 (біогазові системи) та Вимоги Міжнародної організації праці (МОП) щодо агросектору.

У рамках цивільного захисту необхідно передбачити дії на випадок аварійної ситуації, а саме витік дигестату: локальний розлив концентрату дегестату, використання адсорбентів, швидке повідомлення керівника робіт (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Структура цивільного захисту агропідприємства, де використовують дигестат як органічне добриво анаеробного зброджування

Фізичні небезпеки. Травмування від насосів, мішалок, компресорів, котлів. Опіки при контакті з гарячими поверхнями обладнання. Падіння під час обслуговування високих ємностей.

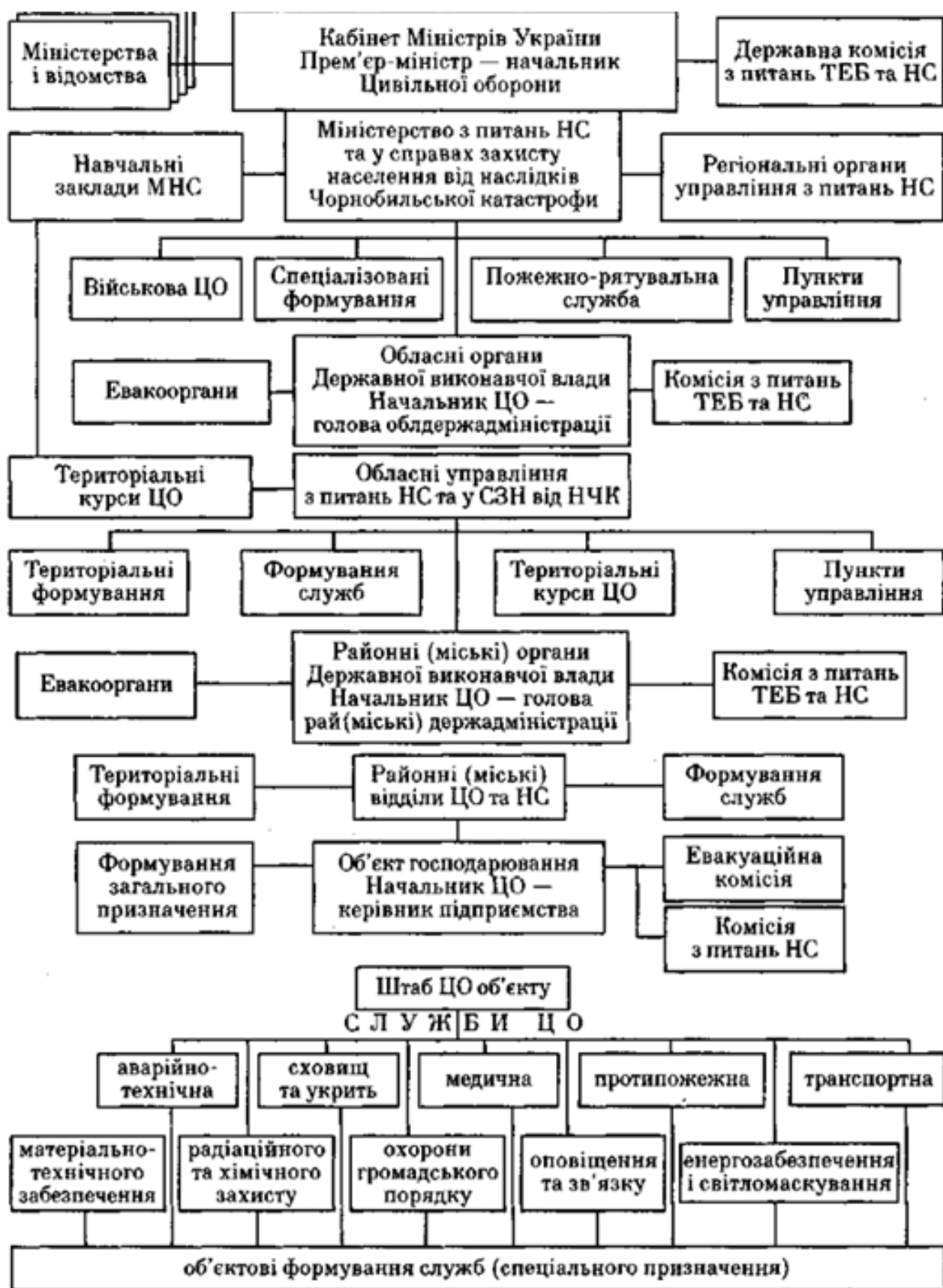


Рис. 5.2. Структура цивільного захисту в межах України

Хімічне забруднення повітря: евакуація персоналу із зони ураження, провітрювання приміщень (сірководень (H_2S): смертельно небезпечний газ із різким запахом, блокує дихальні ферменти людини; амоніак (NH_3): подразнює дихальні шляхи, слизові оболонки та очі; Вуглекислий газ (CO_2): у високих концентраціях витісняє кисень і може призвести до асфіксії.

Пожежна безпека: дигестат є нетоксичною рідиною з низькою пожежонебезпечкою, однак обладнання для його переробки може бути вибухонебезпечним через утворення метану. Обов'язкове встановлення газоаналізаторів у місцях зберігання [55].

Метан (основна складова біогазу) має межі вибуховості в повітрі від 5 до 15%. При витоку та накопиченні газу навіть незначна іскра може спричинити вибух. Біогазові установки повинні бути обладнані системами автоматичного контролю концентрацій газів та аварійними клапанами.

У гної, відходах харчової промисловості, стоках тваринницьких комплексів містяться патогенні бактерії (сальмонела, кишкова паличка), віруси, а також яйця гельмінтів. Працівники під час завантаження сировини контактують із біологічно небезпечним матеріалом, що вимагає спеціальних заходів захисту.

Можливі надзвичайні ситуації, які можуть виникнути у виробничому процесі: аварійний витік метану з ризиком вибуху; отруєння працівників сірководнем; пожежі через коротке замикання; руйнування газгольдерів через тиск.

В разі наведених вище надзвичайних ситуацій необхідна негайна евакуація персоналу; зупинка подачі сировини та відключення обладнання; повідомлення ДСНС та інших екстрених служб; локалізація витоку газу; використання засобів індивідуального захисту при ліквідації наслідків.

Що стосується стихійних лих та воєнних дії, які можуть спричинити можливість пошкодження біогазових установок внаслідок обстрілів необхідно забезпечити резервні джерела електроенергії для підтримання роботи критичного обладнання та укриття для працівників на території підприємства.

З метою удосконалення систем безпеки необхідне впровадження цифрових систем моніторингу (датчики IoT для газів, температури, тиску); дистанційне управління установками; використання дронів для контролю герметичності резервуарів; створення національної програми навчання операторів біогазових станцій; адаптація досвіду Німеччини, Данії та Австрії, де біогазові комплекси інтегровані у циркулярну економіку.

Охорона праці та цивільний захист у агросфері, зокрема при експлуатації біогазових установок, мають ключове значення для безпеки персоналу та навколишнього середовища. Дотримання комплексних заходів (інженерних, організаційних, медичних, санітарних) дозволяє мінімізувати ризики. В умовах сучасних викликів (воєнний стан, енергетична криза, зміна клімату) безпека праці є не лише питанням охорони здоров'я працівників, а й стратегічним фактором стійкого розвитку аграрного сектору.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. З огляду літературних джерел та інформації із інтернету впливає, що дигестат як побічний продукт анаеробного зброджування органічних відходів є ефективним органічним добривом для відновлення родючості деградованих та виснажених ґрунтів.

2. Дигестат як органічне добриво демонструє більш швидкий та помітний ефект порівняно з гноєм, компостом та сидератами. Гній та компост ефективні для довгострокового підтримання родючості, але поступаються за швидкістю покращення показників. Сидерати забезпечують додаткову органічну масу, але мають обмежений вплив на макроелементи та потребують тривалого часу для прояву ефекту.

3. Внесення дигестату призводить до збільшення вмісту органічної речовини на 6,6–45,0%, доступного азоту на 23,1–38,5 %, P_2O_5 та K_2O на 10–15 %, а також покращення кислотності ґрунту (підвищення рН на 0,3–0,5 одиниць). Це створює більш сприятливі умови для росту культур, підвищує їх продуктивність і зменшує втрати поживних речовин у ґрунті.

4. Використання твердої фази дигестату стимулює чисельність і активність *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Azotobacter* spp., що сприяє прискоренню ферментних процесів у ґрунті та мінералізації органічної речовини.

5. Органо-мінеральне добриво – дигестат сприяє збільшенню вмісту гумусу на 1,06%, та вмісту гумінових кислот на 33,3%, а фульвокислот – на 8,3% порівняно з контролем. Відношення гумінових кислот до фульвокислот зросло на 0,11, що вказує на зниження фульватизації гумусу та покращення його якісних показників через підвищення вологоємності та здатності утримувати поживні речовини.

6. Дослідження показали, що внесення дигестату на виснажені ґрунти значно підвищує їх родючість за рахунок комплексного впливу на хімічні, фізичні та біологічні властивості ґрунту. На 5 добу польових досліджень розмір

рослин (пшениці озимої) дослідної ділянки перевищував аналогів із контрольної ділянки на 54,5%, а на 20 добу – відповідно на 59,3%.

7. Використання дигестату як органічного добрива дозволяє: зменшити залежність від мінеральних добрив; оптимізувати витрати на відновлення деградованих ґрунтів; підвищити стійкість ґрунтової екосистеми та її біологічний потенціал; стимулювати природні гуміфікаційні процеси, що сприяє довготривалому відновленню родючості.

ПРОПОЗИЦІЇ

Впровадження використання анаеробного дигестату як органічного добрива у сільськогосподарську практику дозволяє швидко відновлювати деградовані та виснажені ґрунти, забезпечує комплексний вплив на їх властивості та покращує екологічну стійкість агроландшафтів. Рекомендується інтегрувати дигестат у програми органічного землеробства, комбінуючи його з сидератами та компостом для досягнення максимального ефекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Веремеєнко С. І., Семенко Л. О. Сучасні проблеми деградації ґрунтів – трофічний аспект// Наукові горизонти Scientific horizons, 2019, № 1 (74). С.69-75. doi: 10.332491/2663-2144-2019-74-1-69-75.
2. Грановська Л.М. Теоретико-методологічні аспекти управління регіональною еколого-економічною системою. Збалансоване природокористування. 2015. № 4. С. 31-37
3. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко. Київ : ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с.
4. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення : керівний нормативний документ / За ред. Яцука І. П., Балюка С. А. 2-ге вид., допов. К., 2019. 108 с.
5. Юркевич Є. О., Бойко П. І., Коваленко Н. П., Валентюк Н. О. Науковотехнологічні та агробіологічні основи високопродуктивних агроєкосистем України: монографія. Одеса: Вид-во ТОВ «Видавничий центр», 2021. 654 с.
6. Балюк С. А., Медведєв В. В., Воротинцева Л. І., Шимель В. В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. Вісник аграрної науки. 2017. № 8. С. 5-11.
7. Гамаюнова В. В. Ефективність сумісного застосування соломи і мінеральних добрив на врожай і якість сільськогосподарських культур в умовах зрошення півдня України : автореф. канд. дис. Київ, 1983. 22 с.
8. В. Л. Самохвалова Біологічні методи ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. Режим доступу : <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:QaJ1I4blaiYJ:publication.s.lnu.edu.ua/journals/index.php/biology/article/download/168/167&cd=9&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>

9. Національне багатство України – чорноземи – під загрозою знищення / Святослав Балюк, Анатолій Кучер. Електронний ресурс. Режим доступу : <http://www.golos.com.ua/article/366511>

10. Стойко Н. Є., Стадницька О. В. Ефективне використання деградованих та мало-продуктивних сільськогосподарських земель: аспект планування. Український журнал прикладної економіки. 2020. Т. 5. № 1. С. 333–341.

11. Герасимчук Л. В. Використання дигестату біогазових установок як органічного добрива для відновлення родючості ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2019. №7. С. 55–62.

12. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва біогазу в Україні. *Відновлювана енергетика*. 2019. №3. С. 73–77

13. Петренко О. М., Іваненко Т. С. Агроекологічні аспекти застосування органічних добрив у системах сталого землеробства. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2020. №2. С. 43–51.

14. Сидоренко В. М. Деградовані ґрунти України: класифікація, причини деградації та шляхи відновлення. *Ґрунтознавство і охорона ґрунтів*. 2016. №1. С. 15–23.

15. Гнатюк І. В. Порівняльна характеристика дигестату, гною та компосту за вмістом поживних речовин. *Наукові праці ІЕЕ НААН України*. 2018. С. 64–70.

16. Мельник Ю. П. Сидерати та їх вплив на біологічну активність ґрунту. *Органічне землеробство*. 2021. №3. С. 12–20.

17. Кучерук О. В. Вплив органічних добрив на процеси гуміфікації у ґрунті. *Агроекологія і біотехнологія*. 2020. №4. С. 73–81.

18. Карась Г. І., Левченко П. Ю. Біологічна активність ґрунту при внесенні дигестату. *Екологічний вісник*. 2022. №2. С. 34–41.

19. Федоренко М. С. Безпечність використання дигестату: важкі метали, патогени, залишки антибіотиків. *Ветеринарна біотехнологія*. 2021. №1. С. 47–54.

20. Державна служба України з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів. Норми та вимоги до органічних добрив в Україні. Київ, 2020.
21. FAO. *Anaerobic Digestion and Biogas – A Review of Feedstock, Process, and Applications*. Rome: FAO, 2019.
22. Möller K., Müller T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2012. Vol. 32. P. 163–180.
23. Alburquerque J. A., de la Fuente C., Bernal M. P. Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2012. Vol. 160. P. 15–22.
24. Tambone F., Scaglia, B., D'Imporzano G. et al. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of energy crops. *Waste Management*. 2010. Vol. 30. P. 799–807.
25. Giacomini D. A., Monteiro L. M. Impact of biogas digestate on soil microbiota and crop yield: A meta-analysis. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2021. Vol. 36. P. 230–242.
26. Карпенко, В.І., Козлов, В.В., Городок, Л.П., Горлінський, О.В. (2022). Утилізація відходів з отриманням біопалива і добрив. Проблеми екологічної біотехнології, 421, 67-94.
27. Прокаєва А. (2021). Сучасне керування відходами відповідно до принципів циркулярної економіки: навчальний посібник курсу ZWA deep level. 140 с. URL: <https://zerowastekharkiv.org.ua/wpcontent/uploads/2021/12/posybnic-lekciyebook-5.pdf>.
28. Dahlin J., Nelles M, Herbes C. (2017). Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments. *Resour. Conserv. Recycl.* 118. P. 27-38.

29. Онлайн-семінар (2020). "Можливості використання дигестату біогазових установок як добрив": підсумки та матеріали – SAF Україна.SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1069/>

30. Шинкарчук А., Голуб Н., Козловець М., Козловець О. (2023). Порівняння впливу дигестату, що містить додаткове джерело мікроелементів, на ріст рослин в перші 2 тижні вегетації/ Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (м. Київ, Україна, 7 грудня 2023 р.). С. 183-185.

31. Гончарук І. В., Панцирева Г. В., Вовк В. Ю., Верхолюк С. Д. (2023). Дослідження екологічної безпеки та економічної ефективності дигестату як біодобрива. Збалансоване природокористування. 2. С. 86-92.

32. Стандартизація якості та сертифікація продуктів з дигестату. (2020). SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1029/>

33. Інформаційно-аналітична система управління охороною праці в навчальному закладі / Н.М. Петренко, О.В. Євтушенко // Майбутній науковець - 2018: матеріали всеукр. наук.-практ. конференції, 14 грудня 2018 р. Сєверодонецьк: Східноукр. Ун-т ім. В. Даля. 2018. 4.1 С. 89-90.

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

35. Логоша Р. В., Підвальна О. Г., Кричковський В. Ю. Методологія і методика оцінювання процесів використання та відтворення родючості ґрунту в овочівництві. Бізнес Інформ. 2018. № 10. С. 177-187.

36. Технологія використання біомаси в біогазових установках. Зб. наук. праць НАУ. К.: 2020. № 60.С.18.

37. Логоша Р.В., Паламарчук В.Д., Кричковський В.Ю. Економічна та біоенергетична ефективність використання дигестату біогазових станцій при вирощуванні сільськогосподарських та овочевих культур в умовах євроінтеграції України. Бізнес Інформ. 2022. № 9. С. 40-52.

38. Вовк В.Ю. Використання безвідходних технологій як фактор забезпечення екологізації сільського господарства. Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 29 травня 2020. Житомир. С. 169-172.

39. Використання дигестату МХП Еко Енерджі 2020 URL: <https://saf.org.ua/wp-content/uploads/2020/05/dombrovskyi-mhp-saf-seminardigestat-2020.pdf>

40. Паламарчук В.Д., Коваленко О.А., Кричковський В.Ю. Підвищення ефективності біогазових комплексів за рахунок використання дигестату при вирощуванні сільськогосподарських та овочевих культур. Міжнародний тематичний збірник «Зрошуване землеробство». 2020. № 73. С. 95-101.

41. Мірошніченко М.М., Гладкіх Є.Ю., Ревтьє-Уварова А.В., Панасенко Є.В., Звонар А.М., Сорокотяга Г.В., Коваленко С.С., Смиченко В.М. Оптимізація живлення сільськогосподарських культур (optimization of agricultural crops nutrition). Агрохімія і ґрунтознавство. 2018. № 87. С. 82-91.

42. Тат'яненко В., Скляр О. Г. Використання дигестату в якості органічного добрива. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 05 лютого 2024 р.). Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. С. 184.

43. Захарів О.Я. Ефективність використання дигестату із біогазових реакторів для фермерських господарств / Збірник наукових праць ТДАТУ імені Дмитра Моторного №2(40), 2019. С. 79-86.

44. Паламарчук В.Д., & Кричковський В.Ю. Перспективи використання дигестату для підвищення ефективності біогазових комплексів. Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 29 травня 2020. С. 124-128.

45. Шуило К.П. Дослідження якості біомінерального добрива отриманого в процесі метанового бродіння промислово-побутових відходів / К.П. Шуило, Т.Є. Біленко, Я.О. Колісник, О.Р. Белянська// Тези Дев'ятої

Всеукраїнської науково-практичної конференції «Майбутній науковець – 2018»
м. Северодонецьк, 14 грудня 2018 р. – С.92

46. Стандартизація якості та сертифікація продуктів з дигестату - SAF Україна. SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1029/>.

47. Карпенко, В.І., Козлов, В.В., Городок, Л.П., Горлінський, О.В. Утилізація відходів з отриманням біопалива і добрив. Проблеми екологічної біотехнології, 2022, №421, 126794.

48. Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives / M. Malhotra et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 166. Art. 112642. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112642.

49. Digestate Potential to Substitute Mineral Fertilizers: Engineering Approaches / I. Yu. Ablieieva. Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 9. Issue 1. Pp. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2022.9(1).h1

50. Slepeticene, A., Volungevicius, J., Jurgutis, L., Liaudanskiene, I., Amaleviciute-Volunge, K., Slepety, J., & Ceseviciene, J. (2020). The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. Waste Management, 102, 441-451. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.11.008.

51. Conversion of anaerobic digestates from biogas plants: Laboratory fertilizer formulation, scale-up and demonstration of applicative properties on plants / D. Skrzypczak et al. Renewable Energy. 2023. Vol. 203. Pp. 506-517. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.080.

52. Паламарчук В. Д., Колісник О. М. Сучасна технологія вирощування кукурудзи для енергоефективного та екологічного розвитку сільських територій: монографія. Вінниця: Друк, 2022. 372 с/

53. Біоенергетична Асоціація України (UABIO) <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/v-ukraini-dozvolili-vikoristovuvati-organichni-dobryva-z-vidhodiv-biogazovih-ustanovok/>

54. Dahlin J., Nelles M, Herbes C. Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017. №118. P. 27-38.

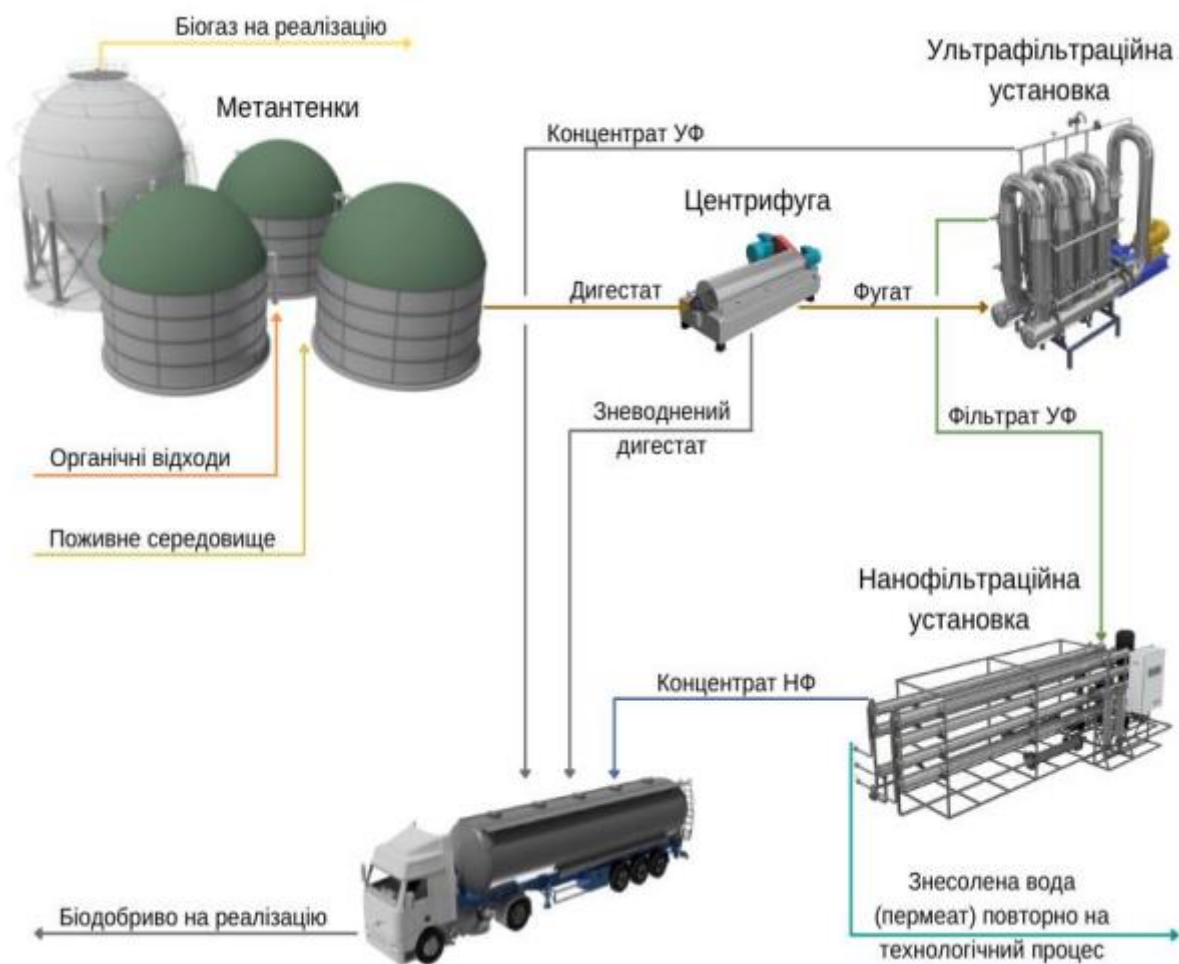
55. Голінько В. І. Основи охорони праці: підручник. Міністерство освіти і науки України. Нац. гірн. ун-т. 2-ге вид. Дніпропетровськ.: НГУ, 2014. 271 с.

56. Закон України «Про охорону праці», листопад 2002 р.

57. Безпека життєдіяльності. Безпека технологічних процесів і виробництв (Охорона праці) / П. П. Кукін, В. Л. Лапін, Н. Л. Пономарьов та ін. Київ: Вищ. шк., 2022. 335 с.

ДОДАТКИ

Додаток А



Логістичні шляхи реалізації дигестату як органічного добрива

Додаток Б

Нормативні значення з техніки безпеки

Фактори виробничого середовища	Норматив	Фактичне значення
Призначення приміщення		розробка
Склад повітря робочої зони		
Шкідлива речовина	ПДК	пил зерновий
Концентрація шкідливої речовини в повітрі робочої зони, мг/м ³	4617-88	8,7
Віброакустичні коливання		
Вид вібрації	ДСН 3.3.6	загальна
Еквівалентний рівень віброприскорення, дБ	.039-99	35
Еквівалентний рівень шуму, дБА	ДСН	24
Рівень інфразвуку, дБ	3.3.6-037-	101
Рівень ультразвуку, дБ	99	40
Неіонізуючі випромінювання		
Напруженість електричного поля радіочастотного діапазону, В/м	ДСН 239-96	29
Напруженість електричного поля промислової частоти, кВ/м		0,52
Довжина хвилі випромінювання оптичного діапазону, нм	СанПиН	0
Тривалість впливу випромінювання оптичного діапазону, с	5804-91	0
Доза опромінення оптичного діапазону, Дж		0
Мікроклімат		
Енерговитрати, Вт	ДСН 3.3.6.042-99	187
Період року		теплій
Температура повітря для постійних робочих місць, °С		8
Відносна вологість повітря, %		42
Швидкість руху повітря, м/с		0,4
Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м ²		147
Виробниче освітлення		
Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	ДБН В.2.5-28-	0,58
Контраст об'єкта розрізнення з фоном	2006	середній
Характеристика фону		світлий
КПО для бокового, природного освітлення, %		0,6
Освітленість для загального штучного освітлення, лк		918
Варіант розрахункового завдання		17