

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ЧУБУР ВІКТОРІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 502.174:628.477(043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
ЦІЛЯХ В ТЕХНОЛОГІЯХ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ**

183 – Технології захисту навколишнього середовища

18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

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

---

В. С. Чубур

Наукові керівники:

Черниш Єлізавета Юріївна, доктор технічних наук, доцент;

Гінек Рубік, доктор філософії, доцент

Суми – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Чубур В. С.* Екологічно безпечна утилізація відходів в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 – технології захисту навколишнього середовища (18 – виробництво та технології) – Сумський державний університет Міністерства науки і освіти України, Суми, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розробленню технологічних рішень утилізації відходів в анаеробних системах отримання енергетичних ресурсів та корисних біопродуктів із зменшенням техногенного впливу на довкілля.

Виконано аналіз техногенного впливу на екосистему під час поводження з відходами різного генезису. Проведена оцінка вибору інтегрованих процесів утилізації відходів для потреб зеленої енергетики на підставі вивчення складу, властивостей і методів їх обробки з розробкою експериментально-методичного комплексу реалізації процесів утилізації відходів в енергетичних цілях.

Для реалізації експериментальних досліджень було розроблено кілька установок моделювання процесу інтенсифікації анаеробної конверсії органічних відходів з використанням фосфогіпсу під час електроферментації та з використанням ультразвукової попередньої обробки відходів.

Встановлена оптимальна концентрація фосфогіпсу під час анаеробного зброджування кількох типів органічних відходів рослинного та тваринного походження, та була розроблена узагальнююча типологія органічних відходів, які можуть використовуватися для потреб зеленої енергетики.

Досліджено вплив різних доз мінерального навантаження з відношеннями 5% та 15% добавки фосфогіпсу до маси сухої речовини рослинного субстрату на виробництво біогазу, вихід метану, якість і концентрацію елементів в дігестаті до та після процесу анаеробного зброджування. У комплексному біопрепараті на

основі дігестату (органічного добрива) із фосфогіпсом порівняно з дігестатом без добавки були визначені значні збільшення концентрації калію, кальцію, кремнію, сірки та алюмінію, що дозволяє використання біопрепаратів на ґрунтах, що потребують відновлення родючості та біостимулювання розвитку корисної ґрунтової біоти.

У процесі інтенсифікації електроферментації органічних відходів із фосфогіпсом як мінеральною добавкою визначено механізми компенсаторної дії на газо-рідинну та тверду фази зброджуваних відходів із зв'язуванням токсичних компонентів в біогазі та дігестаті. Науково та експериментально обґрунтовано, що біоелектрохімічні реакції дозволяють скоротити період стабілізації процесу виходу біогазу і збільшити кількість виділеного біометану. Загальний вихід біогазу з біореактора-електролізера збільшився на 30-35%, продуктивність на 28 добу становила 1525 мл, з яких 640,5 мл метану, порівняно із стандартними умовами на 28 добу вихід біогазу становив 50 мл (з яких 33,4 мл метан). Визначено оптимальний режим проведення електроферментації з постійним електричним струмом силою 20 А протягом 5 хвилин один раз на добу. При цьому вміст сірководню в біогазі з біореактора-електролізера значно нижчий, ніж при стандартних умовах анаеробного збородження. Так, в процесі електроферментації з добавкою фосфогіпсу концентрація сірководню знизилася на 14-й день до 487 ppm, під час стандартних умов концентрація цієї шкідливої домішки становила понад 5000 ppm.

Для моделювання нелінійних процесів конверсії органічних відходів під час сумісної дії фосфогіпсу як мінеральної добавки та різних видів фізико-хімічної обробки було використано нейромережеве моделювання в програмному середовищі STATISTICA Automated Neural Networks. Використовувався Data Mining для аналізу даних, призначений для пошуку раніше невідомих закономірностей у великих масивах інформації, що дає можливість ухвалювати ефективні рішення під час аналізу та прогнозування різних процесів.

Сумісну дію електролізу разом з фосфогіпсом на біоконверсію органічних відходів (електроферментація) продемонстровано в процесі автоматизованого

нейромережевого пошуку. Було змодельовано досягнення пікових значень виходу біометану до 80 000 мл за  $pH=7.4-7.6$  під час підвищення мінералізованості субстрату у порівнянні зі стандартними умовами до 1 000 мл метану за добу. Ця екстраполяція на значні об'єми виходу метану дала змогу змоделювати прояв синергії в процесі електроферментації з додаванням фосфогіпсу до органічних відходів. Показаний ефект є не простою сумациєю впливу електролізної обробки та фосфогіпсу на процес виробництва біогазу, вони детерміновані саморегуляцією в анаеробній біосистемі, яка відображена в автоколиваннях ОВП під час дезінтеграції субстрату та впровадженні додаткових донорів електронів (водню) з їхньою конверсією разом з  $CO_2$  в біометан, з трансформацією локацій іонів металів при дії сульфатної компоненти фосфогіпсу, що спричинила формування якісних відмінностей від стандартної системи анаеробного зброджування з можливістю вироблення більш екологічно безпечних біопродуктів.

Досліджено процес інтенсифікації анаеробного зброджування органічних відходів під час сумісної дії фосфогіпсу як мінеральної добавки та ультразвукової обробки на основі визначення механізмів сумісної дії на газо-рідинну та тверду фази зброджуваних відходів. Експериментально підтверджено підвищення виходу біогазу та покращення біодоступності компонентів мінерального живлення за еколого-трофічними ланками анаеробної системи. Визначено оптимальні параметри обробки, зокрема, 3 хвилинна обробка з досягненням розміру частинок фосфогіпсу 10 мкм в узгодженні з обробкою органічних відходів на прикладі пташиного посліду. Ефекти розміру часток субстрату на якісний вміст метану досягають 65-68% в об'ємі газу за оптимального при заданих умовах режиму роботи біореактора. Покращення показників виробництва біогазу детерміноване модифікацією фізико-хімічних властивостей вихідного розчину для зброджування. Це відбувається частково за рахунок зміни параметрів  $pH$ , ОВП та TDS, а також за рахунок зміни структури субстрату з вивільненням у рідку фазу розчину біогенних речовин. Обрані фактори інтенсивності ультразвукової кавітації призводять до зміни в'язкості, швидкості дифузії розчинених газових компонентів у рідині тощо. Також була отримана нейромережева реалізація

процесу Data Mining для інтенсифікації анаеробного зброджування за допомогою ультразвукової попередньої обробки пташиного посліду та розчину фосфогіпсу. Синергетична дія ультразвукової обробки та фосфогіпсу як мінеральної добавки в процесі анаеробного зброджування прослідковується в наступних отриманих емерджентних властивостях анаеробної біосистеми: підвищення динамічної стійкості біосистеми, що спричиняє продукування екологічно безпечної композиції суміші дигестату та збільшення виходу біогазу і метану в ньому.

Розроблено зведену модель біохімічних шляхів метаногенезу під час процесів інтенсифікації анаеробного зброджування, а також розроблено технологічну систему рішень захисту навколишнього середовища в замкнутому циклі генерації зеленої енергії та переробки відходів в двох варіантах технологічних рішень оброки, що дозволяє знизити рівень техногенного навантаження від різних типів відходів та емісію парникових газів у напрямку досягнення цілей сталого розвитку.

Практична значущість роботи підтверджена результатами впровадженими в рамках спільного українсько-чеського науково-дослідного проєкту "Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів" (2021-2022 рр.), а також у рамках проєкту "AgriSciences Platform for Scientific Enhancement of HEIs in Ukraine"(2020-2022). Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво технології отримання твердофазного продукту ферментації органо-мінерального добрива із анаеробного дигестату в поєднанні з фосфогіпсом, як відходом хімічного виробництва, проведеними на базі Сумського НДІ «МІНДІП» (підтверджено актом впровадження від 15 вересня 2022 року) у м. Суми та СП «ТЕХНОПОЛІС» (підтверджено актом впровадження від 1 жовтня 2022 року). Крім того, отримано патент на корисну модель (патент України №149860, 2021).

Впроваджено в навчальний процес кафедри прикладної екології Сумського державного університету методичний підхід щодо реалізації концепції "зеленої" енергетики в процесах утилізації органічних відходів з отриманням біогазу та біокомпозитів, спосіб інтенсифікація виробництва біогазу в технологіях адаптації

до змін клімату, для досягнення стабільного розвитку екосистеми в умовах високого рівня техногенного навантаження в навчальному процесі дисциплін «Техноекологія», «Біотехнології в промисловості» та «Інноваційні підходи до розроблення технологій захисту довкілля» (акт від 7 квітня 2022 року). Крім того, впроваджено у межах проекту "Біоенергетичні інновації в управлінні відходами: Європейський досвід впровадження циркулярної економіки" програми ЄС Еразмус+ Жан Моне (BIOINWASTE, № 101085172) в 2022. Також у межах спільного освітнього проекту "Екомайнінг: Development of Integrated Ph.D. Program for Sustainable Mining & Environmental Activities" під час досліджень технології утилізації відходів в енергетичних цілях в Технічному університеті "Bergakademie Freiberg" (Німеччина).

**Ключові слова:** анаеробне зброджування, утилізація фосфогіпсу, інтенсифікація виробництва біогазу, технології захисту навколишнього середовища.

## ABSTRACT

*Chubur V. S.* Environmentally safe utilisation of waste for energy purposes in environmental protection technologies. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of 183 – Environmental Protection Technologies (18 - Production and Technology) – Sumy State University of the Ministry of Science and Education of Ukraine, Sumy, 2023.

The dissertation is dedicated to the development of technological solutions for waste utilization in anaerobic systems for energy resource and useful bioproducts production with a reduction of environmental impact.

The study analyzes the anthropogenic impact on ecosystems during the management of waste of various genesis. An assessment of the selection of integrated waste utilization processes for the purposes of green energy was carried out based on the study of their composition, properties, and processing methods, with the development of an experimental and methodological complex for implementing waste utilization processes for energy purposes.

Several experimental setups were developed for modeling the process of intensifying anaerobic conversion of organic waste using phosphogypsum during electrofermentation and ultrasonic pre-treatment of waste.

Optimal phosphogypsum concentration during anaerobic digestion of various types of organic waste of plant and animal origin was determined and a generalized typology of organic waste that can be used for green energy needs was developed.

The effect of different doses of mineral loadings with ratios of 5% and 15% of phosphogypsum additive to the dry matter mass of plant substrate on biogas production, methane yield, quality, and concentration of elements in digestate before and after the anaerobic fermentation process was investigated. Significant increases in potassium, calcium, silicon, sulfur, and aluminum concentrations were identified in the complex bioproduct based on digestate (organic fertilizer) with phosphogypsum compared to digestate without additives, allowing to use bioproduct on soils that require fertility restoration and bio-stimulation of beneficial soil biota.

During the electro-fermentation intensification of organic waste with phosphogypsum as a mineral additive, the mechanisms of compensatory action on the gas-liquid and solid phases of fermented waste with the binding of toxic components in biogas and digestate were determined. It was scientifically and experimentally substantiated that bioelectrochemical reactions can reduce the stabilization period of the biogas production process and increase the amount of biomethane produced. The overall biogas output from the electro-lysis bioreactor increased by 30-35%, and the productivity over 28 days was 1525 ml, with 640.5 ml of methane, compared to the standard conditions on the 28th day the biogas yield was 50 ml (33.4 ml of methane). The optimal mode of electrofermentation with a constant electric current of 20 A for 5 minutes once a day was determined. The hydrogen sulfide content in the biogas from the bioreactor-electrolyzer was significantly lower than under standard anaerobic fermentation conditions. During electro-fermentation with the addition of phosphogypsum, the concentration of hydrogen sulfide decreased on the 14th day to 487 ppm, while under standard conditions the concentration of this harmful impurity was more than 5000 ppm.

To model the nonlinear processes of conversion of organic waste during the simultaneous action of phosphogypsum as a mineral additive and different types of physicochemical treatment, neural network modeling was used in the STATISTICA Automated Neural Networks software environment. Data mining was used for data analysis, which is designed to search for previously unknown patterns in large amounts of information, allowing effective decisions during the analysis and forecasting of various processes.

The combined effect of electrolysis with phosphogypsum on the bioconversion of organic waste (electrofermentation) was demonstrated in the process of automated neural network search. Peak values of biogas yield up to 80,000 ml were modeled at pH = 7.4-7.6, with an increase in substrate mineralization compared to standard conditions of up to 1,000 ml of methane per day. This extrapolation to significant volumes of methane yield made it possible to model the manifestation of synergy in the electrofermentation process with the addition of phosphogypsum to organic waste.



The observed effect is not simply the sum of the influence of electrolysis treatment and phosphogypsum on the biogas production process, but is determined by self-regulation in the anaerobic biosystem, which is reflected in the autocorrelation of the ORP during substrate disintegration and the introduction of additional electron donors (hydrogen) with their conversion together with CO<sub>2</sub> into biomethane. This process also involves the transformation of metal ion locations under the action of the sulfate component of phosphogypsum, which leads to the formation of qualitative differences from the standard anaerobic fermentation system, with the possibility of producing more environmentally friendly bioproducts.

The process of intensifying anaerobic digestion of organic waste was investigated by the combined action of phosphogypsum as a mineral additive and ultrasonic treatment. . This was achieved by determining the mechanisms of the combined action on the gas-liquid and solid phases of the digested waste. Experimental results confirmed an increase in biogas yield and improvement in the bioavailability of mineral nutrients along ecological-trophic links of the anaerobic system. Optimal treatment parameters were determined, including a 3-minute treatment to achieve a phosphogypsum particle size of 10 µm in combination with the treatment of organic waste, using poultry manure as an example. The effect of substrate particle size on the methane content reached 65-68% of the gas volume under optimal operating conditions of the bioreactor. The improvement in biogas production was determined by the modification of the physicochemical properties of the initial digestion solution, partially through changes in pH, COD, TDS parameters, and substrate structure with the release of biogenic substances into the liquid phase of the solution. The selected factors of ultrasound cavitation intensity lead to changes in viscosity, diffusion rate of dissolved gas components in the liquid, and other effects. Furthermore, a neural network-based Data Mining approach was obtained to intensify anaerobic digestion using ultrasonic pretreatment of poultry manure and phosphogypsum solution. The synergistic effect of ultrasound treatment and phosphogypsum as a mineral additive in the anaerobic digestion process is reflected in the following emergent properties of the anaerobic biosystem: increased dynamic stability of the biosystem, resulting in the production of

an environmentally safe composition of the digestate mixture and an increase in biogas and methane yields.

A comprehensive model of the biochemical pathways of methanogenesis during intensified anaerobic fermentation processes has been developed. Furthermore, a technological decision system has been designed for environmental protection in a closed cycle of green energy generation and waste processing in two variations of technological solutions. This system enables a reduction in the level of technological load from various types of waste and greenhouse gas emissions towards achieving sustainable development goals.

The practical significance of the work is confirmed by the results implemented within the framework of the joint Ukrainian-Czech research project "Bioenergy Innovations in Waste Recycling and Rational Use of Natural Resources" (2021-2022), as well as within the framework of the project "AgriSciences Platform for Scientific Enhancement of HEIs in Ukraine" (2020-2022). Practical recommendations have been developed for the implementation of a technology for obtaining a solid-phase product of fermentation of organo-mineral fertilizer from anaerobic digestate in combination with phosphogypsum, a waste of chemical production, carried out at the Sumy Research Institute "MINDIP" (confirmed by the implementation act of September 15, 2022) in Sumy city and SP "TECHNOPOLIS" (confirmed by the implementation act of October 1, 2022). In addition, a patent for a utility model has been obtained (Ukrainian patent No. 149860, 2021).

A methodological approach for the implementation of the "green" energy concept in the processes of organic waste utilization to produce biogas and biocomposites has been introduced into the educational process of the Department of Applied Ecology at Sumy State University. This approach includes the intensification of biogas production technologies in adaptation to climate change, to achieve sustainable development of ecosystems in conditions of high levels of technology is implemented in the disciplines "Technoecology", "Biotechnology in Industry", and "Innovative Approaches to Environmental Protection Technologies" (Act of April 7, 2022).

Additionally, it has been implemented within the framework of the European Union Erasmus+ Jean Monnet program project "Bioenergy Innovations in Waste Management: European Experience in Circular Economy" (BIOINWASTE, No. 101085172) in 2022. Furthermore, research on waste utilization technology for energy purposes is being conducted at the Technical University "Bergakademie Freiberg" (Germany) as part of the joint educational project "Eco-mining: Development of an Integrated Ph.D. Program for Sustainable Mining and Environmental Activities."

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

*Статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України*

1. Данилов Д. В., **Чубур В. С.**, Черниш Є. Ю., Яхненко О. М. (2020) Біоенергетична утилізація відходів: моделювання напрямків розвитку. Людина та довкілля. Проблеми неоекології 34: 141-152. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2020-34-14>

2. Chernysh Y, Shtepa V, Roy I, **Chubur V**, Skvortsova P, Ivlieva A, Danilov D (2021) The potential of organic waste as a substrate for anaerobic digestion in Ukraine: trend definitions. Environmental Problems 6(3):135–144. <https://doi.org/10.23939/ep2021.03.135>

3. **Chubur V**, Chernysh Y, Ferchau E, Zaffar N (2022) Effect of Phosphogypsum Addition on Methane Yield in Biogas and Digestate Properties During Anaerobic Digestion. Journal of Engineering Sciences 9(1):H11–H18. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).h2](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).h2)

4. **Чубур В. С.**, Черниш, Є. Ю., Скиданенко М. С., Данилов Д. В., Білоус О. О. (2022) Переробка пташиного посліду в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях 3(13):86–92. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.13>

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричною базами даних Scopus та Web of Science*

5. Chernysh Y, Yakhnenko O, **Chubur V**, Roubík H (2021) Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects. Applied Sciences 11(4):1575. <https://doi.org/10.3390/app11041575> (Scopus; Web of Science)

6. Chernysh Y, Roy I, **Chubur V**, Shulipa Y, Roubík H (2021) Co-digestion of poultry litter with cellulose-containing substrates collected in the urban ecosystem. Biomass Convers Biorefin. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01582-y> (Scopus; Web of Science)

7. Shtepa V, Balintova M, Chernysh Y, **Chubur V**, Demcak S, Gautier M (2021) Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks. *Applied Sciences* 11(16):7551. <https://doi.org/10.3390/app11167551> (Scopus; Web of Science)

8. Haneklaus N, Barbossa S, Basallote M D, Bertau M, Bilal E, Chajduk E, Chernysh Y, **Chubur V**, Cruz J, Dziarczykowski K, Fröhlich P, Grosseau P, Mazouz H, Kiegiel K, Nieto J M, Pavón S, Pessanha S, Pryzowicz A, Roubík H, Zakrzewska-Kołtuniewicz G (2022) Closing the upcoming EU gypsum gap with phosphogypsum. *Resour Conserv Recycl* 182:106328. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106328> (Scopus; Web of Science)

9. Chernysh Y, Balintova M, Shtepa V, **Chubur V**, Junakova N (2022) Effect of Electrolysis on Activated Sludge during the Hydrolysis and Acidogenesis Stages in the Anaerobic Digestion of Poultry Manure. *Sustainability* 14:6826. <https://doi.org/10.3390/su14116826> (Scopus; Web of Science)

10. Chernysh Y, Shtepa V, Danilov D, Plyatsuk L, **Chubur V** (2022) Anaerobic Digestion Combined with Electrolysis of Poultry Manure and Activated Sludge Inoculum. *Problems of the Regional Energetics* 2(54):101-113. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.09> (Scopus; Web of Science)

11. **Chubur V**, Danylov D, Chernysh Y, Plyatsuk L, Shtepa V, Haneklaus N, Roubik H (2022) Methods for Intensifying Biogas Production from Waste: A Scientometric Review of Cavitation and Electrolysis Treatments. *Fermentation* 8(10):570. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100570> (Scopus; Web of Science)

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

12. Chernysh Y., Bálintová M., **Chubur V**. Modeling of hydrogen sulfide removal under biomethane production in the concept of renewable energy potential growth of Ukraine. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005001>

13. Данилов Д. В., **Чубур В. С.**, Черниш Є. Ю., Яхненко О. М. Біоенергетична утилізація відходів: моделювання напрямків розвитку. Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування:

освіта – наука – виробництво – 2020 : зб. тез доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 17-18 грудня 2020 року). Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 35-37.

14. **Чубур В. С.** Потенціал анаеробного зброджування органічних відходів в Україні. 6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» : збірник матеріалів (09 – 10 лютого 2021 року). Львів : Західно-Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ), ТзОВ, 2021. С. 112.

15. **Чубур В. С.** Вплив магнітної обробки на процеси анаеробного зброджування органічних відходів. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Суми : СумДУ, 2021. С. 174.

16. **Chubur V.**, Balintova M., Chernysh Y., Shtepa V., Demcak S. Intensification of anaerobic conversion of wastewater and sewage sludge: trends analysis. 2nd International Scientific Conference on Ecological and Environmental Engineering (30 June - 1 July 2021). Wrocław, Poland, 2021. P. 35-37

17. **Чубур В. С.**, Каменський М. Є., Черниш Є. Ю., Штепа В. М. Комбінації енергетичного використання аквакультур у системі замкнутого водопостачання теплових електростанцій. Збірник наукових праць VIII Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю, м. Вінниця, (22-24 вересня 2021). Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 26-28.

18. Chernysh Y., Kharytonov M., **Chubur V.**, Yakhnenko O., Ablieieva I., Roubík H. Bioenergy processes of organic waste recycling and phosphogypsum utilization. Sustainable Development Trends and Challenges under COVID-19 : Book of abstracts 2nd Multidisciplinary Conference for Young Researchers, Sumy (29–30 November 2021). Prague, 2021. P. 47–48.

19. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д., **Чубур В. С.**, Г. Рубік. Біоенергетичні інновації для цілей сталого розвитку. Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», присвяченої

203-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2-3 грудня 2021 року). Полтава : НУПП, ПП «Астроя», 2021. С. 345-348.

20. **Чубур В.**, Черниш Є., Данилов Д., Білоус О., Пляцук Л., Ярошенко О., Штепа В., Рубік Г. Експериментальне дослідження анаеробного збродження пташиного посліду з інокулятом активного мулу. III міжнародний науковий симпозіум «Сталий розвиток – стан та перспективи» (26-29 січня 2022), Львів – Славське : Збірник матеріалів. Київ : Яроченко Я. В., 2022. С. 62-65.

21. **Чубур В. С.** Електроліз у біопроеесах анеробного зброджування. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2022 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Суми : СумДУ, 2022. С. 149.

22. **Chubur V.**, Danilov D., Skvortsova P. Bioenergy aspects of sewage sludge management. The exploratory workshop NeXT-Chem 'Innovative Cross-Sectoral Technologies' IVth Edition 19-20 May. Bucharest, 2022. P. 36.

23. Черниш Є. Ю., **Чубур В. С.**, Рубік Х. Використання мінеральних добавок під час анаеробного зброджування: тренди. Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 11–12 травня 2022 року. Рівне : НУВГП, 2022. С. 399.

24. Chernysh Y., Kharytonov M., **Chubur V.**, Shtepa V., Roubik H. Application of biochar of different genesis: applied aspects of activation. ISB-INMA TEN' 2022 International Symposium. Agricultural and mechanical engineering (6-8 October 2022). Bucharest, 2022. P. 22-31.

25. Черниш Є. Ю., **Чубур В. С.**, Скиданенко М. С., Соколов О. С., Данилов Д. В., Білоус О. О., Рубік Г. Автоматизація систем моніторингу та контролю параметрів метаногенезу в процесі анаеробного збродження відходів. Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2022» (27 жовтня 2022). Харків, 2022. С. 225–227.

26. Chernysh Y. Y., **Chubur V. S.**, Haneklaus N., Roubik H. Ecological properties of phosphogypsum and its products: biogeosystem technique for management. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 23–25 листопада 2022 року. Суми : Сумський державний університет, 2022. С. 97-102.

27. Черниш Є. Ю., **Чубур В. С.**, Рубик Г. Огляд можливостей утилізації фосфогіпсу під час анаеробного зброджування органічних відходів з використанням методології аналізу життєвого циклу. Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» : Матеріали. Електронне видання. Дніпро : Журфонд, 2022. С. 241-242.

28. **Чубур В. С.** Вплив сумісного зброджування ко-субстратів на вихід біогазу. Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро : ДДАЕУ, 2022. С. 149-150.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

30. Черниш Є.Ю., Пляцук Л., Чубур В.С. Спосіб одержання біопалива та біодобрив з органічних відходів : пат. 149860 U Україна : C02F 11/04 (2006.01). № u 202104252 ; заявл. 20.07.2021 ; опубл. 08.12.2021, Бюл. № 49. 6 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/89589>.

31. Chernysh Y, Roy I, **Chubur V**, Fukui M, Koziy I. (2021) Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing; p. 319-28. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_32)



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОВОДЖЕННЯ ІЗ ВІДХОДАМИ РІЗНОГО ГЕНЕЗИСУ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦІЛЯХ	27
1.1 Технологічні рішення утилізації органічних відходів з отриманням зеленої енергії	27
1.1.1 Технології біоенергетичного рециклінгу відходів для зниження техногенного навантаження на довкілля	27
1.1.2 Моделювання взаємозв'язків між кластерами біоенергетики як комплексне рішення для захисту навколишнього середовища	39
1.2 Моделювання кластерів напрямів поводження з фосфогіпсом та визначення альтернативних технологічних рішень для його використання в технологіях переробки органічних відходів	42
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	50
2.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження	50
2.1.1 Характеристика органічних відходів як сировини для переробки в біоенергетичних технологіях	50
2.1.2 Характеристика органічних відходів, що були взяті для дослідження	58
2.1.3 Характеристика фосфогіпсу як мінеральної добавки в анаеробному збродженні	60
2.2 Експериментальні установки дослідження	66
2.2.1 Установка електроферментації для сумісної обробки органічних відходів разом із фосфогіпсом	66

2.2.2	Ультразвукова установка попередньої обробки органічних відходів разом із фосфогіпсом	67
2.2.3	Експериментальна установка анаеробного збродження відходів	68
2.3	Методи дослідження	69
2.3.1	Комплексна методика проведення еколого-біохімічних досліджень утилізації фосфогіпсу в біоенергетичних технологіях переробки органічних відходів	69
2.3.2	Методика нейромережевої реалізації Data Mining анаеробних процесів	74
	Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ СУМІСНОЇ ОБРОБКИ ВІДХОДІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦІЛЯХ	79
3.1	Дослідження процесу інтенсифікації виробництва біогазу за допомогою електроферментації із застосуванням нейромереж	79
3.2	Дослідження ультразвукової інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом із фосфогіпсом	84
3.3	Комплексний біопрепарат на основі дігестату (органічного добрива) із фосфогіпсом та продукування біогазу за варіації дозування фосфогіпсу	90
	Висновки до розділу 3	94
РОЗДІЛ 4	НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СУМІСНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ НА ЗАСАДАХ ЕКОЛОГО-СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ	96
4.1	Еколого-синергетичні засади інтенсифікації анаеробного збродження за допомогою фосфогіпсу в біоенергетичних технологіях	96

4.1.1	Синергетична дія фосфогіпсу як мінеральної добавки та електролізу в процесі електроферментації	96
4.1.2	Синергетична дія ультразвукової обробки та фосфогіпсу як мінеральної добавки в процесі анаеробного збродження	109
4.2	Науково-практичне обґрунтування доцільності залучення фосфогіпсу в біоенергетичні технології переробки органічних відходів	111
	Висновки до розділу 4	119
	ВИСНОВКИ	123
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123
	ДОДАТКИ	134

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК

ЄС – Європейський Союз (ЄС)

ОВП – окисно-відновний потенціал

TDS – загальної мінералізації речовини

ХСК – хімічне споживання кисню

ФГ – фосфогіпс

НДР – науково-дослідна робота

УЗ – ультразвукова обробка

ТПВ – тверді побутові відходи

НМ – нейронні мережі

РБФ – нейромережа радіально-базисної функції

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У всьому світі зростає усвідомлення того, що відновлювана енергетика та енергоефективність є життєво важливими для створення нових економічних можливостей та контролю за забрудненням навколишнього середовища. При цьому слід пам'ятати, що забруднення навколишнього середовища та енергетична нестабільність є одними з ключових викликів у 21 столітті. З метою зменшення залежності від викопних видів палива, одним з варіантів є перетворення органічних відходів шляхом анаеробного зброджування в біогаз. Біогаз, отриманий шляхом анаеробного зброджування органічних відходів, вважається важливою технологією для поліпшення стану навколишнього середовища, оскільки він вирішує проблеми управління відходами і одночасно виробляє біогаз як основний продукт і дигестат як побічний продукт, який також може бути використаний в якості добрива. Виробництво біогазу шляхом анаеробного зброджування одна з найбільш енергоефективних та екологічно чистих форм енергії та технологій виробництва відновлюваної енергії. І хоча перетворення відходів на біогаз є усталеною технологією, вона все ще недостатньо використовується і не досягла свого повного потенціалу.

Перспективним є розроблення технологічних рішень утилізації відходів в анаеробних системах отримання енергетичного ресурсу та корисних біопродуктів із зниженням техногенного впливу на довкілля.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.**

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету згідно плану наукових досліджень кафедри і є складовою частиною НДР «Оцінка техногенного навантаження регіону за зміни промислової інфраструктури» згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0121U114478); «Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» (№ держреєстрації 0116U006606), у межах спільного

українсько-чеського науково-дослідного проєкту "Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів" на 2021-2022 рр. (Державний номер реєстрації: 0121U113753), а також в межах проєкту "Біоенергетичні інновації в управлінні відходами: Європейський досвід впровадження циркулярної економіки" програми ЄС Еразмус+ Жан Моне (BIOINWASTE, № 101085172), 2022. Також реалізовано у рамках проєкту "AgriSciences Platform for Scientific Enhancement of HEIs in Ukraine"(2020-2022); в межах спільного освітнього проєкту "Екомайнінг: Development of Integrated Ph.D. Program for Sustainable Mining & Environmental Activities" під час спільних досліджень технології утилізації відходів в енергетичних цілях в Технічному університеті "Bergakademie Freiberg" (Німеччина).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення технологічних рішень утилізації відходів в анаеробних системах отримання енергетичного ресурсу та корисних біопродуктів із зниженням техногенного впливу на довкілля.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

- провести аналіз техногенного впливу на екосистему при поводженні з відходами різного генезису;
- науково обґрунтувати вибір інтегрованих процесів утилізації відходів для потреб зеленої енергетики на підставі вивчення складу, властивостей і методів їхньої обробки;
- розробити експериментально-методичний комплекс реалізації процесів утилізації відходів в енергетичних цілях;
- провести моделювання процесу інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом з фосфогіпсом під час електроферментації;
- дослідити процес інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів при введенні фосфогіпсу в систему із використанням ультразвукової обробки;
- розробити зведену модель біохімічних шляхів метаногенезу під час процесів інтенсифікації анаеробного збродження;

- на підставі проведених досліджень розробити технологічні рішення захисту навколишнього середовища в замкнутому циклі генерації зеленої енергії та переробки відходів.

*Об'єкт дослідження* – техногенний впливу відходів різного генезису при їхній сумісній утилізації.

*Предмет дослідження* – процес утилізації відходів в анаеробних системах отримання енергетичного ресурсу та корисних біопродуктів.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- уперше здійснено обґрунтування процесу інтенсифікації електроферментації органічних відходів під час синергетичної дії фосфогіпсу як мінеральної добавки та електролізу на основі визначення механізмів компенсаторної дії на газо-рідинну та тверду фазу зброджуваних відходів із зв'язуванням токсичних компонентів в біогазі та дигестаті;

- уперше здійснено обґрунтування процесу інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів під час синергетичної дії фосфогіпсу як мінеральної добавки та ультразвукової обробки на основі визначення механізмів підсилюючої дії на газо-рідинну та тверду фазу зброджуваних відходів із підвищенням виходу біогазу та покращення біодоступності компонентів мінерального живлення за еколого-трофічними ланками анаеробної системи;

- уперше експериментально встановлена оптимальна концентрація фосфогіпсу під час анаеробного збродження кількох типів органічних відходів рослинного та тваринного походження;

- набув подальшого розвитку еколого-синергетичний підхід до процесів сумісного впливу мінеральних компонентів фосфогіпсових відходів із залученням фізико-хімічних методів інтенсифікації анаеробного збродження, що дозволяє отримати екологічно безпечний енергетичний ресурс та корисні біопродукти;

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблена система технологічних рішень захисту навколишнього середовища в замкнутому циклі генерації зеленої енергії та переробки відходів різного генезису на засадах

еколого-синергетичного підходу. Отримано патент на спосіб одержання біопалива та біодобрих з органічних відходів, що включає подрібнення, нагрівання, гомогенізацію, анаеробне перероблення в реакторі органічних відходів, таких як курячий послід з целюлозовмістною добавкою з сухого листа у дозі не менше 30 % за сухою речовиною від маси органічних відходів. Спосіб дозволяє отримати біогаз з високим вмістом метану та біодобриво за рахунок збагачення доступною добавкою на основі вторинних ресурсів (патент України №149860, 2021, Додаток В).

Упроваджено в навчальний процес кафедри прикладної екології Сумського державного університету методичний підхід щодо реалізації концепції “зеленої” енергетики в процесах утилізації органічних відходів з отриманням біогазу та біокомпозитів, спосіб інтенсифікація виробництва біогазу в технологіях адаптації до змін клімату для досягнення стабільного розвитку екосистеми в умовах високого рівня техногенного навантаження у дисципліни «Техноекологія», «Біотехнології в промисловості» та «Інноваційні підходи до розроблення технологій захисту довкілля» (акт впровадження від 7 квітня 2022 року). Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво технології одержання твердо фазного продукту ферментації органо-мінерального добрива із анаеробного дигестату в поєднанні з фосфогіпсом, як відходом хімічного виробництва, проведеними на базі Сумського НДІ «МІНДІП» (підтверджено акт впровадження від 15 вересня 2022 року) м. Сум та СП «ТЕХНОПОЛІС» (підтверджено акт впровадження від 1 жовтня 2022 року) (Додаток Б).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведення планування, збір даних і аналіз експериментальних досліджень, опублікованих у літературних та інтернет джерелах, експериментальне дослідження застосування обробок в процесах анаеробної ферментації органічних відходів (Додаток А).



Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів, узагальнення отриманої інформації та формулювання висновків виконувались здобувачем спільно з науковими керівниками.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях: «E3S Web of Conferences. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters» (2021), XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво» (Харків, 2020), 6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2021), VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 2021), «4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange» (Львів, 2021), «2nd International Scientific Conference on Ecological and Environmental Engineering» (Wrocław, 2021), «VIII Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю» (Вінниця, 2021), «2nd Multidisciplinary Conference for Young Researchers» (Суми, 2021), «II Міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Довкілля. Енергозбереження» (Полтава, 2021), III міжнародний науковий симпозіум «Сталий розвиток – стан та перспективи» (Львів – Славське, 2022), IX Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми, 2022), «Міжнародна науково-практична конференція молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки» (Рівне, 2022), «Innovative Cross-Sectoral Technologies» (Bucharest, 2022), «ISB-INMA TEN' 2022 International Symposium. Agricultural and mechanical engineering» (Bucharest, 2022), Міжнародна науково-практична конференція за участю молодих науковців «Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2022» (Харків, 2022), VI Міжнародна науково-практична конференція «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (Шостка,

2022), Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Дніпро, 2022).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано **30** наукових праць, серед них: **11** публікацій у фахових виданнях, у тому числі: **7** статті у наукових виданнях, що індексуються нукометричними базами даних Scopus та Web of Science; **4** статті – у виданнях, що входять до наукових видань, включених до переліку наукових фахових видань України; **17** тез доповідей на Всеукраїнських та Міжнародних науково-практичних конференціях; **1** патент на корисну модель України, **1** розід в науковому виданні, що індексуються в Scopus.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 101 найменування на 11 сторінках, та 6 додатки на 20 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінок, з яких основного тексту – 102 сторінок, робота містить 58 рисунків та 11 таблиці.

## РОЗДІЛ 1

**АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОВОДЖЕННЯ  
ІЗ ВІДХОДАМИ РІЗНОГО ГЕНЕЗИСУ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦІЛЯХ****1.1 Технологічні рішення утилізації органічних відходів з  
отриманням зеленої енергії****1.1.1 Технології біоенергетичного рециклінгу відходів для зниження  
техногенного навантаження на довкілля**

Світове виробництво орієнтується на розвиток енергоефективних та екологічно чистих технологій у всіх сферах людської діяльності для вирішення існуючих проблем, пов'язаних з виснаженням традиційних невідновлюваних енергетичних природних ресурсів, забрудненням навколишнього середовища та зростанням чисельності населення. До таких технологій відносяться, насамперед відновлювані джерела енергії, зокрема енергія біомаси, яка виробляється з відходів тваринництва та сільського господарства, деревних відходів, рослинної біомаси, плантацій морського фітопланктону та з продуктів фотобіореакторів [1, 2].

Враховуючи вимоги Кіотського протоколу, ряд країн (Бразилія, Велика Британія, Данія, Німеччина, Ірландія, Швеція, Фінляндія, США та ін.) досліджують біоенергетичний кластер в напрямку зменшення викидів в атмосферу вуглекислого газу та використання біомаси для виробництва енергії. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA) у 2019 році світове виробництво біоенергії становило приблизно 557 853 ГВт-год, а потужність станом на 2020 рік 127 201 МВт, з них на біогазову частину виробництва 91 819 ГВт-год та потужність 20 108 МВт відповідно [3]. За умов структури сільськогосподарського сектору України станом на 2020 рік теоретичний енергетичний потенціал виробництва біогазу з відходів та побічних продуктів агропромислового комплексу становив 2,8 млрд м<sup>3</sup> біогазу на рік, а

навіть з розрахунку доступності теоретичного потенціалу для енергетики у 42%, це становить майже 1 млн тонн нафтового еквіваленту енергії [4]. Проте, прогноз енергетичного потенціалу біомаси в Україні відповідно до даних Дорожньої карти розвитку біоенергетики до 2050 року становить 8,4 млрд м<sup>3</sup> біогазу на рік, з потенціалом доступним для енергетики у майже 6 млн тонн нафтового еквіваленту [5].

Завдання виробництва біопалива полягає у ефективному скороченні викидів CO<sub>2</sub> та отриманні енергії з біомаси. Співвідношення між енергією біопалива та енергією, що використовується у виробництві біопалива, повинно мати позитивний енергетичний баланс. Однак виробництво біопалива з нульовим або від'ємним енергетичним балансом також можливе, якщо за рахунок такого рішення досягається позитивний екологічний ефект в результаті виробництва чистої енергії в місцях споживання [6, 7]. На сьогодні багато країн (США, Канада, Німеччина, Бразилія, Індія та інші), що мають значні запаси традиційних енергоресурсів, вже досягли значного технічного прогресу у виробництві біопалива і продовжують розвивати біоенергетичний сектор.

Переваги біоенергетики видимі в сфері скорочення викидів парникових газів та забезпечення сталого розвитку завдяки використанню чистих та відновлюваних джерел енергії, зниженням залежності від невідновлюваних джерел енергії, разом з економічним зростанням сільського господарства, розвитком сільських територій, зниженням виробничих витрат, підвищенням якості та конкурентоспроможності товарів, підвищенням національної безпеки для країн з обмеженими природними ресурсами.

Альтернативні джерела енергії впевнено набирають обертів в Україні через енергетичну кризу, а процес анаеробного зброджування органічної біомаси з отриманням біогенного газу (водню та біометану) та органічних добрив (біокомпосту або дигестату) набуває більшої ролі як альтернативне джерело енергії [8]. Виробництво та склад біогазу варіюються залежно від характеристик сировини та технологічного процесу. Основною сировиною є енергетичні культури, які вирощуються спеціально для цієї мети (кукурудза, зернові,

цукровий буряк та багато інших), а також відходи сільського господарства та тваринництва. До них також відносяться органічні відходи харчової промисловості (наприклад, макуха, відходи жируловлювачів), овочеві відходи з оптових ринків, харчові відходи, скошена трава, матеріали, отримані в результаті ландшафтних робіт, а також органічні відходи з побутових сміттєзвалищ. Утилізація біогенних відходів для виробництва біогазу вирішує проблему їх накопичення на територіях та забруднення повітряного і ґрунтового середовищ речовинами, що утворюються при розкладанні органіки в умовах неналежної утилізації.

Різні субстрати мають різну продуктивність виходу біогазу, а також різні показники вмісту метану в біогазі. Наразі у світі використовується або розробляється понад 60 різних типів біогазових технологій [9].

Виробництво енергії з біогазу не пов'язане з часом доби, сезоном або погодними умовами, тому його можна виробляти безперервно, залежно від попиту. У Німеччині, завдяки фіксованому тарифу на постачання електроенергії з біогазу, електроенергія та тепло виробляються в безпосередній близькості до біогазової установки, і це є основним способом використання біогазу. У випадку великих відстаней між місцем виробництва та місцем використання, біогаз можна транспортувати газопроводами.

Біометан можна відокремити від інших супутніх газів з біогазу за допомогою мокрого очищення під тиском, адсорбції при змінному тиску, процесів фізичного та хімічного очищення, а також мембранної технології [10].

Виробництво біометану є об'єктом уваги науковців та розробників у багатьох країнах. Причиною цього є значне підвищення енергоефективності цього виду газодобувного процесу за рахунок використання органічної біомаси для виробництва біометану та можливість подачі його до загальної газової мережі з різними цілями використання.

Системи переробки органічних відходів із виробництвом енергоносіїв вважаються екологічно чистими [11]. Але будь-яка система під час її створення, експлуатації та утилізації має створює відходи, викиди та скиди в навколишнє

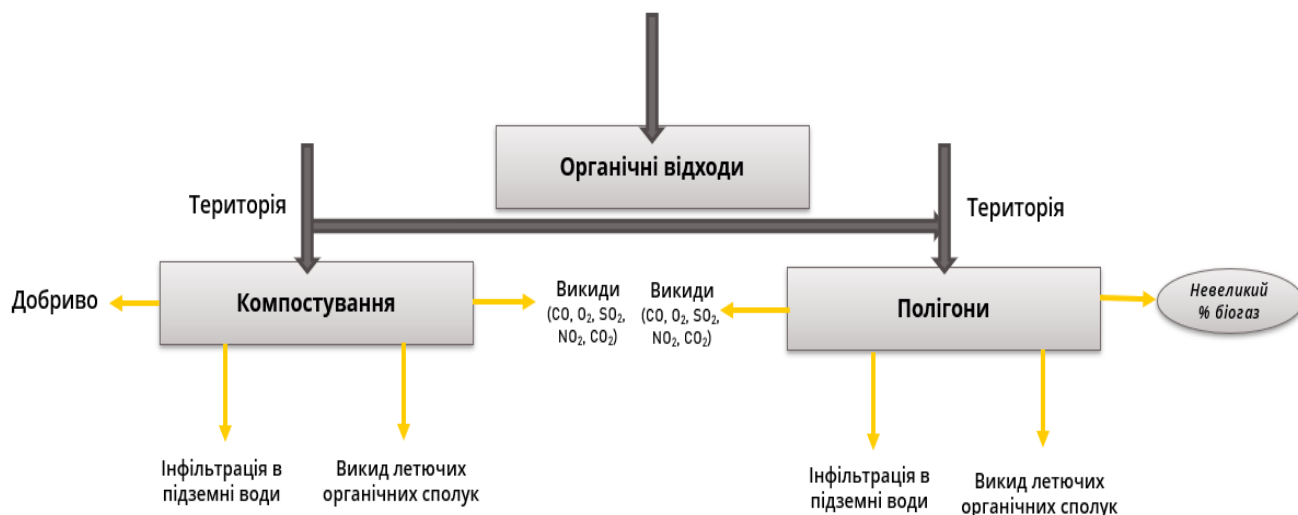
середовище і спричиняє, таким чином, техногенні ризики. З урахуванням того, що експлуатація технологічних рішень їхньої переробки та утилізації створює відходи, викиди та скиди в навколишнє середовище і призводить, таким чином, до підвищення рівня техногенної небезпеки, під час оцінювання екологічної ефективності систем виробництва енергоносіїв з органічних відходів на рис. 1.1 порівняно зменшення техногенного впливу, що пов'язане із утилізацією відходів і зменшенням витрат первинних енергоносіїв та додаткового техногенного навантаження, яке виникає у системі протягом її життєвого циклу.



Рисунок 1.1 – Фактори порівняння екологічної ефективності систем виробництва енергоносіїв з органічних відходів

Зокрема, під час спалювання рослинних або тваринних відходів, на відміну від традиційних енергоресурсів баланс  $\text{CO}_2$  є збалансованими. Про те технології утилізації органічних відходів без виробництва енергоносіїв мають значну втрату теплоти. А при анаеробному зброджуванні теплота процесу зв'язана у вигляді метані, що також є перевагою біогазових технологій над простим компостуванням. Порівняння викидів з стратегій зберігання та виробництва енергії при поводженні з органічними відходами наведено на рисунку 1.2.

а)



б)

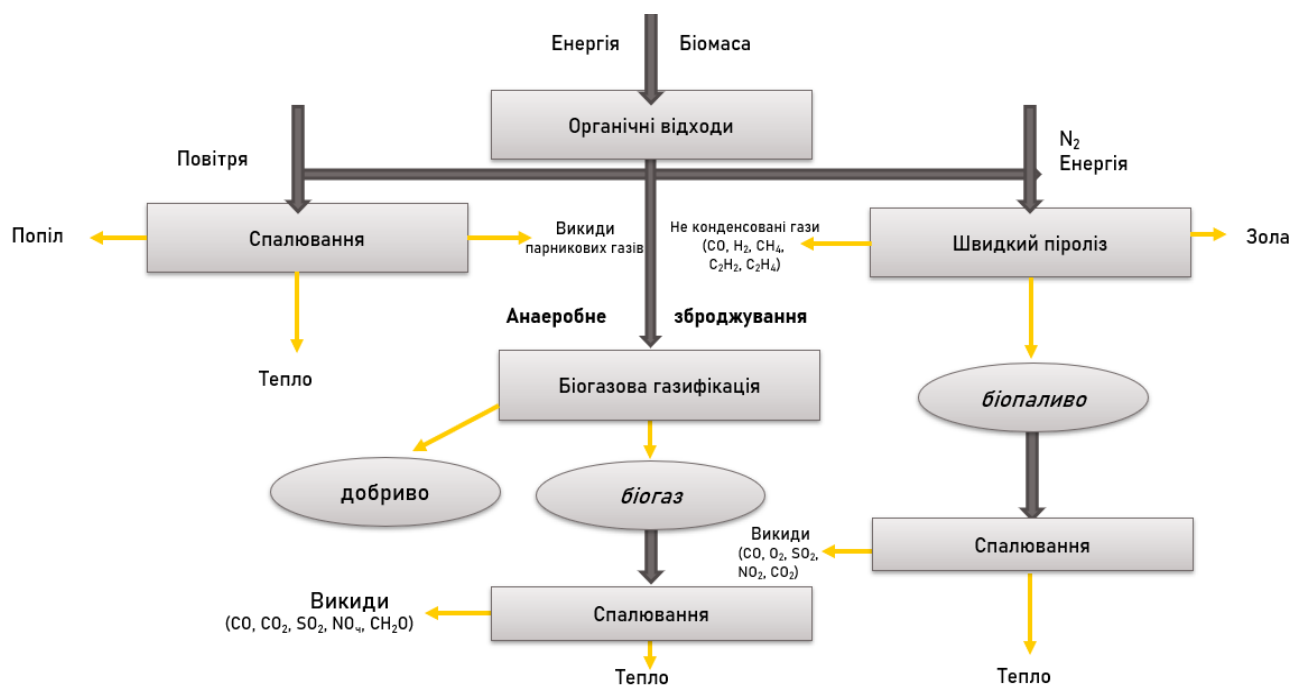


Рисунок 1.2 – Порівняння викидів з стратегій зберігання та виробництва енергії при поводженні з органічними відходами: а) викиди в процесі зберігання органічних відходів; б) викиди в процесі виробництва енергії з органічних відходів

Екологічна проблематика процесу спалювання характеризується 2 основними потоками шкідливих речовин при спалюванні відходів – залишки спалювання, які необхідно захоронювати, і викиди в атмосферу.

Порівняно з компостуванням, анаеробне зброджування краще підходить для органічних залишків, що легко розкладаються, включаючи відходи харчової промисловості, оскільки він може виробляти метан для виробництва енергії. Компостні системи є більш ефективними, ніж анаеробне зброджування, при розкладанні деревної біомаси. Однак компостування вимагає аерації та поповнення води для підтримання оптимальних умов для життєдіяльності мікроорганізмів. Після анаеробного збродження або компостування органічний продукт можна вносити в землю для сільськогосподарських або ландшафтних цілей як добриво або поліпшення. Однак пряме не лімітоване внесення дигестату може призвести до неконтрольованих викидів парникових газів, оскільки у відходах залишається субстрат, що розкладається, фітотоксини та метаногенна мікробіота [12].

Хоча виробництво біогазу має значний потенціал інвестиційної привабливості завдяки сприятливим природно-кліматичним умовам та низькій собівартості, Україна починає впроваджувати відновлювані джерела енергії, а технічні та економічні проблеми виробництва та використання біогазу ще потребують подальшого вивчення [9].

На основі досліджень наукових журналів, що індексуються в базі даних Scopus, виявляється, що розвиток опублікованих біоенергетичних досліджень розпочався з 1998 року. До 2007 року спостерігався різкий спад у дослідженнях, після чого тема набувала все більшої популярності. Наразі максимальна кількість досліджень була досягнута у 2018 році – 60 досліджень (рис. 1.3). У 2019 та 2020 роках кількість досліджень на цю тему зменшувалася у зв'язку з карантинними заходами та громадськими рухами.

Тема біоенергетичних досліджень є актуальною в аграрних країнах та країнах з великою кількістю органічних відходів. Лідером у дослідженнях за цією тематикою та кількістю публікацій є Сполучені Штати Америки – понад 100 наукових робіт, далі йдуть Китай – 60 робіт, Німеччина та Велика Британія – понад 50 робіт та Швеція – понад 20 робіт (рис. 1.3).



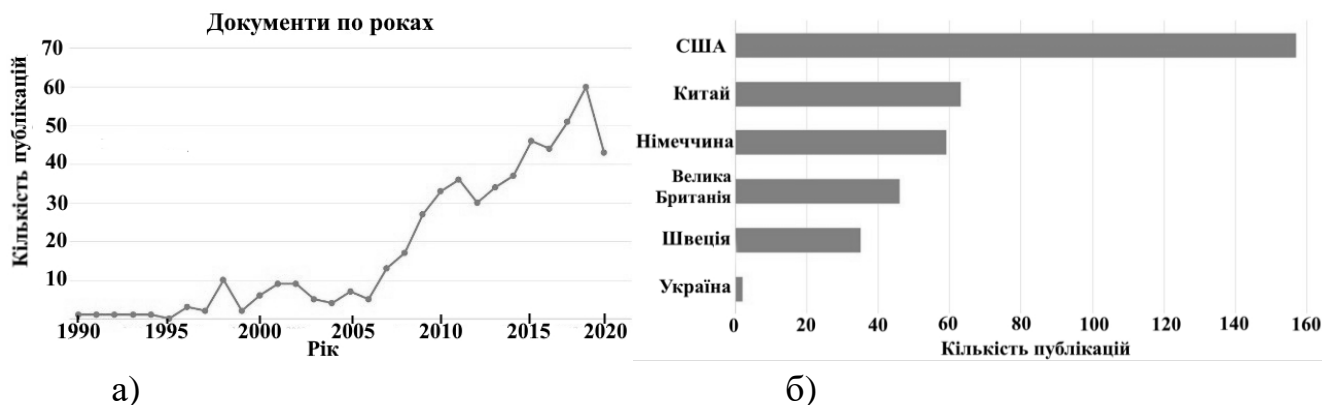


Рисунок 1.3 – Аналіз результатів пошуку: а) за роками; б) за країнами

Найбільша кількість наукових досліджень присвячена покращенню екологічної ситуації в регіонах та енергетичному секторі, виробництву біопалива, а також хімічній інженерії з виробництвом різноманітних корисних хімічних добавок (рис. 1.4). Основні напрямки досліджень є актуальні для України.



Рисунок 1.4 – Аналіз результатів пошуку за тематикою досліджень у сфері біоенергетичних технологій

Останнім часом в Україні спостерігалось послідовне зростання кількості об'єктів та встановлених потужностей для виробництва теплової та електричної енергії з біомаси. Незважаючи на те, що темпи розвитку біоенергетики в Україні відстають від європейських, наукові дослідження продовжуються та

розширюються. Українські дослідження також активно проводяться в сфері інтенсифікації та підвищення ефективності виробництва біогазу, що є одним із основних напрямків їх досліджень. У наукових дослідженнях інтенсифікація процесу анаеробного збродження досягається за рахунок комбінації сировини [13, 14], попередньої обробки [15, 16] та добавок [17]. Ці розробки стосуються окремих компонентів виробничого процесу. В той час як в в зарубіжних дослідженнях інтенсифікація біогазових процесів розглядається в аспектах інтенсифікації процесу анаеробного збродження [18, 19] та комплексної інтенсифікації системи, що включає виробництво біогазу [20, 21].

На рис. 1.5 показано схему варіацій методів інтенсифікації анаеробного збродження, яка була сформована на основі аналізу сучасних тенденцій у цій галузі.



Рисунок 1.5 – Методи інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів

Впровадження попередньої дезінтеграційної обробки може значно збільшити виробництво біогазу та зменшити кількість летких загальних твердих речовин, а також забезпечити краще зневоднення [22]. Відповідно досліджень

[23], комбіноване гомогенізуюче перемішування та кавітаційна дезінтеграція з використанням ультразвукових або гідрокавітаційних систем дають кращу енергоефективність на одиницю, ніж ті ж процеси, що використовуються окремо. Обробка змішаного осаду стічних вод з додаванням ферментів перед анаеробним зброджуванням покращує розкладання осаду та збільшує виробництво метану. Однак висока вартість виробництва ферментів обмежує використання ферментативного гідролізу на промислових біогазових установках [24]. Додавання водню до процесу зброджування не впливає на збагачення складу біогазу, натомість значно збільшує кількість виробленого газу. Це пов'язано зі збільшенням виробництва біогазу за рахунок перетворення водню в ацетат і подальшого перетворення його в метан [25]. Перспективними технологічними рішеннями для насичення воднем можуть бути електротехнологічні пристрої, засновані на електролітичних процесах. Вплив магнітних полів на мікроорганізми є суперечливим, але добре розрахована напруженість магнітного поля може сприяти ферментації анаеробних бактерій. Вплив магнітних полів на анаеробне зброджування було підтверджено експериментами [26], було визначено, що занадто висока або занадто низька індукція магнітного поля не є сприятливою для анаеробного зброджування органічних залишків.

Таким чином, можуть бути реалізовані різні комбінації попередньої обробки та інтенсифікації анаеробного зброджування, що підвищує ефективність біопроцесу.

Біопроееси зазвичай протікають повільніше, ніж стандартні хімічні процеси. Тому перспективним напрямком досліджень є застосування мікробіологічних методів інтенсифікації біопроеесів, таких як іммобілізація біоплівки на мінеральних носіях та формування стабільних, перманентних умов протікання біопроеесів з урахуванням навантаження на органічну речовину та наявності токсикантів. Тому корисним є поєднання фізико-хімічних методів, таких як кавітація, електроліз та електромагнітна обробка. Крім того, поєднання фізико-хімічних методів попередньої обробки, таких як кавітація, електроліз та

магнітна обробка, збільшують біологічну здатність органіки до розкладання, як і при додаванні мінеральних добавок/хімічних побічних продуктів [27].

На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають такі фактори: температура [28], вологість середовища, рівень рН, співвідношення C:N:P, площа поверхні частинок сировини, щільність подачі субстрату [29], інгібуючі речовини [30], стимулюючі добавки [31].

Стимулювати виробництво біогазу можна за допомогою кавітації для розкладання біомаси. Під впливом спрямованої та керованої кавітації в біологічній сировині відбувається руйнування складних волокнистих зв'язків органічних речовин на молекулярному рівні. Завдяки цьому процесу дисперсність біологічної сировини значно збільшується, а її частинки зменшуються в розмірах до 0,1-8 мкм. Тому всім видам бактерій, які беруть участь у процесі біогазоутворення, легше розкласти біогенні матеріали на всіх стадіях, оскільки руйнується їх гомогенна структура, а отже, збільшується площа покриття бактеріями біологічної сировини [32,33]. При деградації біомаси клітинних і субклітинних матеріалів більш інтенсивно вивільнюються природні ферменти, які є біологічними каталізаторами процесу перетравлення біомаси. Це також збільшує кількість виробленого біогазу. Високий ступінь подрібнення та гомогенізації субстрату перед потраплянням у біореактор, як наслідок, збільшення кількості частинок на поверхні дозволяє збільшити та інтенсифікувати виробництво біогазу на 30-50% [34,35].

Анаеробне зброджування є типом непрямого міжвидового процесу між консорціумом мікроорганізмів з перенесенням електронів [36], тому вплив електромагнітних полів на процес анаеробного зброджування має ефект і стимулює міжгрупові взаємодії між бактеріями та археями. Застосування електромагнітних полів для інтенсифікації виходу біогазу показало, що магнітне поле з індукцією 0,38 Тл має значний вплив на процес зброджування метану. Вихід біогазу збільшився на 14% порівняно з необробленим субстратом. Більш значущим для анаеробного процесу є електрокінетичне розкладання, як один з високовольтних електричних методів. Електричне поле деформує клітинні стінки,

тому їх вміст стає легко доступним для бактерій [37]. Крім того, обробка електричними імпульсами високої напруги в рідкому середовищі дозволяє досягти інактивації мікроорганізмів при більш низьких температурах і за менший час експозиції, ніж традиційні методи термічної пастеризації, що сприяє кращому збереженню в продуктах термолабільних компонентів. Тож вплив електричних імпульсів високої напруги на рідке середовище можна позиціонувати як перспективний метод інактивації мікрофлори рідкого середовища з мінімальним термічним руйнуванням продуктів [38-40].

Для керування фізико-хімічними параметрами з метою інтенсифікації процесу метагенезу розглядаємо кавітацію та електроліз як актуальні методи інтенсифікації, що підвищують деградацію субстрату та мікробну активацію. В результаті застосування керованого кавітаційного процесу в деструкторах біомаси ці процеси знайшли широке застосування у виробництві біогазу, як наведено в Додатку Г [41-54].

Біореактор з електролізним елементом забезпечує вищу енергоефективність та виробництво біогазу, що було вивчено і підтверджено кількома дослідженнями. Систематичне розуміння мікробних взаємодій та виробництва біометану і водню в біореакторі мікробного електролізу є обмеженим [55]. Біореактор електролізер збільшує виробництво біометану та водню з осаду завдяки синтетичній взаємодії між ферментативними бактеріями, екзоелектрогенами та метаногенними археями. Крім того, в реакторі мікробного електролізу спостерігається декілька шляхів виробництва газу: ферментація та електролітичне виробництво  $H_2$ , а також гідрогенотрофний метаногенез та електрометаногенез [56]. Можливість додаткового електролітичного виробництва водню в системі електролізу також відкриває перспективу застосування в інноваційних біопроцесах, таких як фотоферментація [57] і темнова ферментація [58].

Деякі реакції виробництва метану, що здійснюються біокатодними спільнотами, описані в літературі, але для з'ясування молекулярних шляхів необхідні подальші дослідження. В огляді [59-61] зібрані деякі результати

молекулярних досліджень в галузі електрометаногенезу, кожен з шляхів реакцій може бути використаний для виробництва метану (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Виробництво компонентів, необхідних для біокатодних процесів.

Елемент для каталізації процесів	Тип реакції	Опис	Бактеріальні групи
Електрони з електродів	$\text{HCO}_3^- + \text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	Каталізація виробництва водню та метану за допомогою електронів. Відновлення $\text{CO}_2$ до $\text{CH}_4$ .	<i>Hydrogenotrophic methanogens</i> ( <i>Methanobacterium</i> or <i>Methanobrevibacter</i> )
Перенесення електронів або водню	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (електричний струм), $\text{H}_2$	Забезпечується функціональна кореляція між видами. Участь у передачі енергії (пряме перенесення електронів або водню) між поверхнею електрода та метаногенними популяціями.	Between <i>Desulfovibrionaceae</i> family and the phylum <i>Euryarcheota</i>
Відновлення кисню	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Види бактерій можуть посилювати виробництво метану, споживаючи кисень, який є токсичним для метаногенних архей.	<i>Hydrogenophaga caeni</i> , <i>Methylocystis</i> sp. and <i>Acidovorax caeni</i>
Відновлені сполуки ( $\text{H}_2$ або форміат) як доступний субстрат	$\text{HCO}_3^- + \text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{HCOO}^- + 3\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	Використовують катодні електрони для виробництва відновлених сполук швидше, ніж їх метаболічна здатність використовувати.	<i>Methanothermobacter</i> , <i>Methanomicrobiales</i> , <i>Methanococcales</i> , <i>Methanocellales</i>

В електрометаногенних біоелектрохімічних системах відомі три шляхи: шлях відновлення  $\text{CO}_2$ , метилотрофний та ацетокластичний шляхи. Шлях відновлення  $\text{CO}_2$ , який стимулює виробництво метану, вважається основним визначальним фактором загальної продуктивності системи, але інші шляхи також важливі [62]. Тому ацетокластичний метаногенез дуже часто переважає в промислових умовах [63] виробництва біогазу, оскільки він базується на можливості біоконверсії ацетатів з отриманням метану ( $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ).

### **1.1.2 Моделювання взаємозв'язків між кластерами біоенергетики як комплексне рішення для захисту навколишнього середовища.**

На основі даних бази даних Scopus за допомогою кластерного програмного забезпечення VOSviewer було сформовано 4 кластери (рис. 1.6):

1) кластер (червоний) розкриває екологічні проблеми зміни напрямку впровадження стаціонарних джерел енергії з розвитком біоенергетичного потенціалу та створення стратегій цього розвитку на рівні регіонів;

2) кластер (жовтий) висвітлює процес відновлення екологічних систем, зокрема лісів та зменшення викидів CO<sub>2</sub> від біоенергетики;

3) кластер (зелений) охоплює виробництво та використання різних видів палива та енергії, вироблених шляхом впровадження та вдосконалення біоенергетичних технологій;

4) кластер (синій) – вплив біоенергетичних технологій на відновлення та очищення довкілля і зменшення шкоди від антропогенного впливу.

Накладна візуалізація, показана на рис. 1.7, була визначена як більш ефективний інструмент для перевірки останніх тенденцій у дослідженнях у часовому розрізі. Розмір кружечків відповідає переважанню періоду, коли опубліковано дослідження в даній галузі. Колір залежить від року публікації (середній для кластера), останній рік - жовтий. Таким чином, терміни "паливо" та "заміна" найбільш інтенсивно використовуються у зв'язку з роком публікації.

З наведеної візуалізації видно, що біогаз вивчається в різних сферах застосування. Існують різні системи класифікації, в роботі [64] розробили типову біогазову систему з 3 шляхами утилізації: комбіноване виробництво теплової та електричної енергії з біогазу, біогазові твердооксидні паливні елементи та модернізація біогазу. За результатами оцінки системи, шлях модернізації біогазу має найвищу систематичну енергоефективність та найкоротший період окупності. Сучасні технології збагачення біогазу систематизовано обговорюються в роботі [65]. Огляд показав, що існує потреба в подальших дослідженнях втрат метану (CH<sub>4</sub>), екологічного ефекту, споживання енергії та обговорення проблем економічної оцінки.

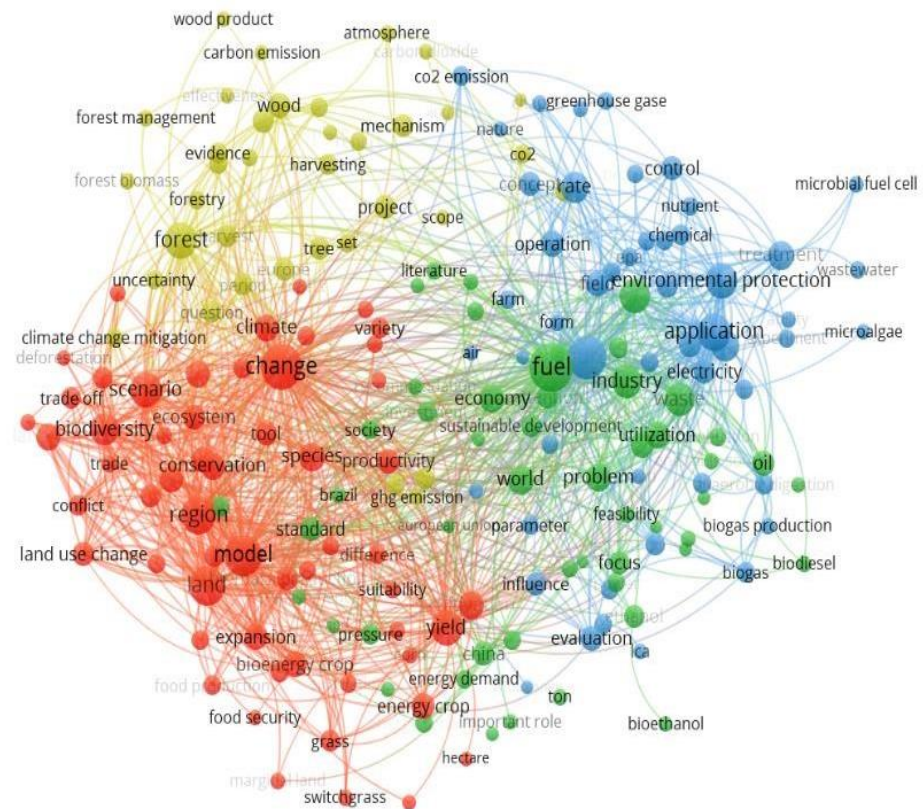


Рисунок 1.6 – Візуалізація мережі: 4 кластери, 11545 посилань, загальна сила зв'язків 27577 (дані бази даних Scopus)

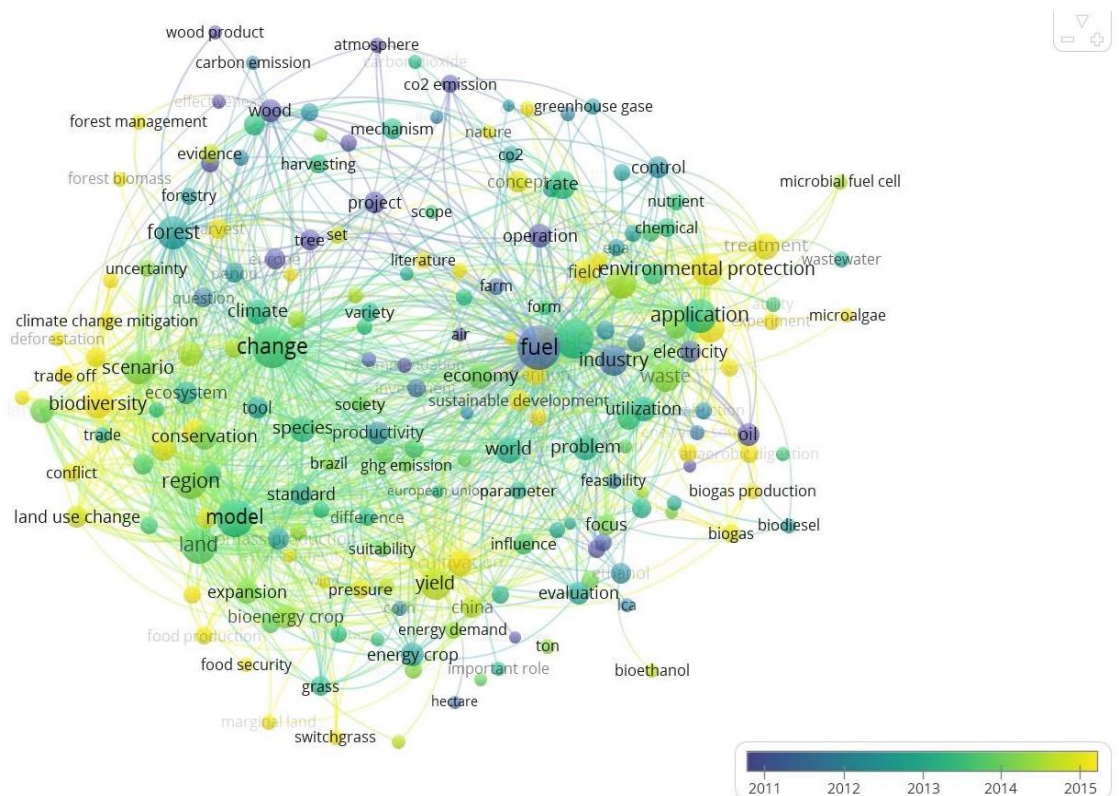


Рисунок 1.7 – Загальна візуалізація, де одиницею виміру є час з моменту публікації (дані бази даних Scopus)



Одним з основних кластерів дослідження є питання зміни напрямку в бік біоенергетики та створення нових моделей розвитку. Біоенергетика добре розвинена в країнах ЄС. Згідно з аналізом [66] спостерігається рух до механізму ринку потужності для підтримки біогазу в електроенергетиці, що уповільнює темпи впровадження біогазу на зрілих ринках електроенергії з біомаси в ЄС. Кілька країн ЄС продовжують підтримувати динаміку своїх ринків електроенергії з біогазу. Проте, біогаз стикається з жорсткою конкуренцією з сонячною та вітровою енергією і недорогим природним газом, тому необхідна подальша модернізація процесу виробництва біогазу та біометану. За очікуваннями [67] інвестиції в анаеробне зброджування будуть успішними завдяки низькій вартості доступної сировини - лігноцелюлозних джерел (підстилка гною, фрукти, овочеві відходи) та широкому спектру застосувань біогазу. Дослідження статті зосереджені на покращенні контролю анаеробного зброджування та його ефективності, тобто мікробна активність є вирішальним параметром для стабільності процесу та виходу біогазу, і це потребує подальших досліджень. У статті [68] розглянуто ферментативну та біологічну попередню обробку сировини для виробництва біогазу. Біологічна попередня обробка є високоефективним методом збільшення виробництва біогазу та найменш витратним методом обробки лігноцелюлозної біомаси в процесі виробництва біогазу. За допомогою селекції нових високопродуктивних штамів мікроорганізмів та застосування молекулярно-генетичних методів можливе подальше підвищення ефективності ферментних препаратів та здатності мікроорганізмів до трансформації субстратів.

Вплив біоенергетичних технологічних рішень критично обговорюється в роботі [69]. У цій роботі демонструється, що використання біогазу може суттєво сприяти зменшенню викидів парникових газів, але також може спричинити небажані викиди метану та  $N_2O$ . Останні не пов'язані безпосередньо з викидами, що виникають від спалювання біогазу, а залежать від того, як зберігається біомаса та як відбувається поводження з дигестатом, які є критично важливими етапами обробки. У середньо- та короткостроковій перспективі метантенки вважаються кращими порівняно з необробленою біомасою відповідно. Перехід на біометан

загалом може покращити якість повітря та зменшити викиди парникових газів. Однак втрати метану у відхідних газах можуть вплинути на стійкість всього процесу.

## 1.2 Моделювання кластерів напрямів поводження з фосфогіпсом та визначення альтернативних технологічних рішень для його використання в технологіях переробки органічних відходів

За допомогою програми VOSviewer здійснено візуалізацію взаємозв'язків кластерів за ключовим словом «фосфогіпс» у наукових публікаціях з різних сфер використання фосфогіпсу (ФГ) (рис. 1.8, 1.9).

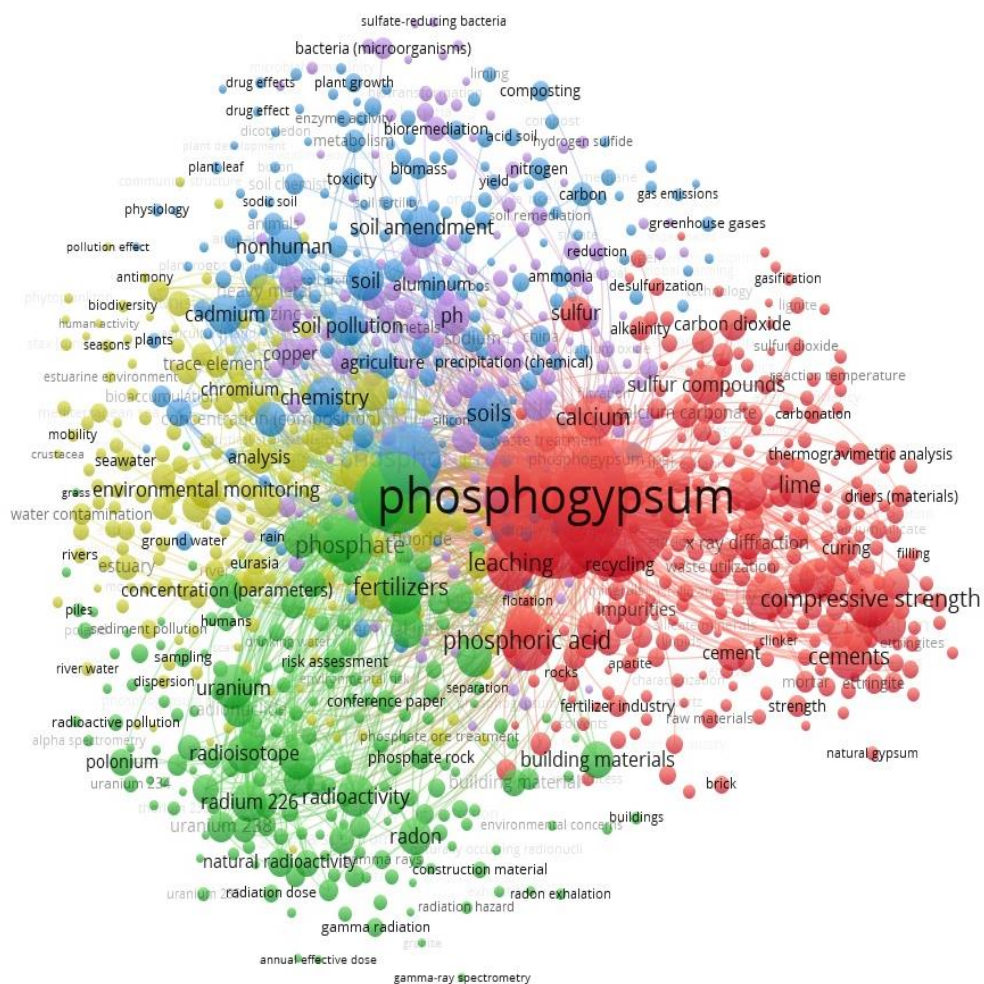


Рисунок 1.8 – Моделювання взаємозв'язків між кластерами напрямів різних сфер використання фосфогіпсу (побудована за допомогою VOSViewer v.1.6.15): 5 кластерів, 94846 з'язків, 209564 загальна інтенсивність з'язків [70]

Згідно з результатами моделювання, було сформовано п'ять кластерів, що відображають різноманітні аспекти використання ФГ. Червоний кластер зосереджується на переробці та використанні ФГ в будівельній галузі, тоді як зелений кластер стосується проблеми радіаційного забруднення ФГ та фосфорних добрив. Жовтий кластер включає моніторинг міграції компонентів ФГ в екосистемі з рухомими формами важких металів та їх надходженням у водоносні горизонти з відвалів ФГ. Блакитний кластер зосереджується на використанні ФГ в сільському господарстві як меліоранту та компонента комплексного добрива. Фіолетовий кластер включає в себе вплив ФГ на мікроорганізми, зокрема в процесах біоремедіації.

Аналіз компонентного складу ФГ має важливе значення для оцінки екологічної безпеки його використання. ФГ може мати варіативний склад домішок, який значно впливає на сферу його можливого застосування, оскільки склад ФГ визначається вихідною фосфоритною сировиною, з якої отримують фосфорні добрива. Тому важливо вивчати компонентний склад ФГ, щоб забезпечити безпеку його використання в різних галузях.

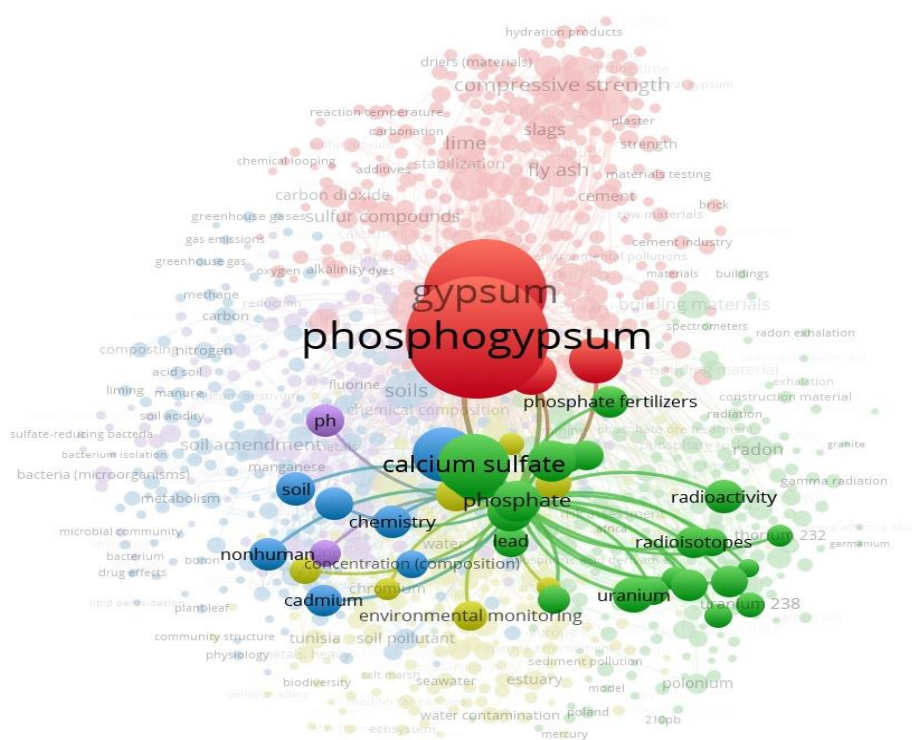


Рисунок 1.9 – Фрагмент накладної візуалізації (побудована за допомогою VOSviewer v.1.6.15) [70]

Як можна побачити на відзначеному фрагменті візуалізації на рис. 1.9, для успішної реалізації конверсії ФГ важливими компонентами є сульфати кальцію у напівгідратній або дигідратній формі, нерозкладені фосфатні залишки та можлива наявність важких металів та радіонуклідів. Головна екологічна загроза пов'язана з наявністю хімічних домішок, що містяться у ФГ у водорозчинній або легкої формі. Кількість радіоактивних, рідкісних та важких металів безпосередньо залежить від їх кількості в фосфатній сировині. Магматичні фосфати, такі як кольський та південноафриканський апатит, мають вищий вміст рідкісних елементів, порівняно з осадовими фосфатами, такими як Марокко, Флорида, Сенегал та інші [71].

Дослідження, які представлені у роботі [72], пропонують енергоефективну методологію виробництва чистого карбонату кальцію з використанням мінералів, які виникають під час розпаду ФГ. Це альтернативне рішення, яке дозволяє екологічно безпечно використовувати ФГ. Чистий карбонат кальцію було отримано шляхом екстракції та мінералізації  $\text{CO}_2$  гідролізним розчином продуктів розпаду ФГ. Швидкість карбонізації досягла понад 90% при насиченні поглинання рідкої фази.

Інше дослідження [73] обґрунтовує доцільність створення рентгенозахисних конструкцій з композиційного матеріалу на основі ФГ. Проте механізми впливу композиційних матеріалів на основі фосфогіпсових в'язучих потребує подальших досліджень у галузі ефективності захисту від рентгеновського та гамма-випромінювання.

Крім того, дослідження [74, 75] зосереджені на використанні ФГ для рекультивациі забруднених ґрунтів після забруднення нафтою або мазутом. Відомий спосіб рекультивациі полягає в тому, що забруднений ґрунт не видаляють, а вносять у ґрунт меліоранти на основі суміші ФГ, піску, перегною та мінеральних добрив (азоту, фосфору та калію) з подальшою оранкою та посівом сільськогосподарських культур. Це один з напрямків використання ФГ в природоохоронних технологіях.

Під час механічної обробки (такої як оранка та внесення ФГ) шари ґрунту перемішуються, що сприяє взаємодії частинок ґрунту, насичених нафтою, з непошкодженими частинками ґрунту. Це зменшує навантаження забруднення на субстрат. Після цього, розкладання органічної складової нафти може відбуватися, зберігаючи кислотну реакцію. Крім того, окисно-відновний потенціал збалансовується, реакції ґрунтового "дихання" відновлюються, що призводить до зменшення інтоксикації та поглинання ґрунтом  $\text{CO}_2$  [74]. Автоморфні ґрунти мають високий рівень ОВП: 550-750 мВ у підзолистих, 400-600 мВ у чорноземах, 350-450 мВ у сіроземах. Зрошення знижує ОВП, тому гідроморфні ґрунти піддаються сильним сезонним коливанням, а при зволоженні ґрунту рівень ОВП значно знижується. Значення нижче 200 мВ відповідають умовам обробки та відновлення, в яких відбуваються процеси трансформації та утворюються відновлені форми сполук заліза та марганцю, сульфіти та нітрити. Накопичення останніх сполук токсично впливають на більшість культурних рослин.

У наукових дослідженнях [75, 76] розглядаються можливості використання ФГ для рекультивації бурового шламу, що накопичується та зберігається на місці буріння. Буровий шлам має властивість набухання у вологих умовах, перетворення у в'язку та липку масу, а також зчеплення та твердість в сухих умовах за рахунок наявності натрію у поглинаючому комплексі. Буровий шлам має високу лужність (рН 8,68-9,10), що може негативно впливати на рослинні види [76]. Для покращення фізико-хімічних властивостей бурового шламу необхідно витіснити поглинений натрій кальцієм, для цього використовуються коагулянти, серед яких особливо ефективним є ФГ. Це пояснюється тим, що ФГ є відходом виробництва, що робить його значно дешевшим за гіпс, має вищу розчинність, а також містить водорозчинний фосфор, що підсилює ефект рекультивації.

Фосфогіпс є перспективним компонентом у біотехнологіях з охорони навколишнього середовища, оскільки має можливості для використання різними еколого-трофічними групами мікроорганізмів під час їх життєдіяльності. Однією зі стратегій поводження з ФГ може бути біоремедіація, яка є безпечною та

економічно вигідною альтернативою традиційним методам. Біопроцеси включають розкладання та детоксикацію забруднень навколишнього середовища з використанням живих організмів, зокрема мікроорганізмів. У дослідженні [77] було вивчено мікробне співтовариство на звалищі ФГ в Тунісі. Виявлено наявність автохтонних бактерій та інших мікроорганізмів, які здатні відновлювати радіоактивні елементи та важкі метали, а також окислювати та відновлювати сульфати у накопиченому фосфогіпсовому відвалі.

Низкою дослідників розглянуто можливість використання біотехнологічних методів для очищення бурових стічних вод шляхом біодеструкції органічних забруднювачів [75, 76]. Ефективність процесу очищення значною мірою залежить від активності мікроорганізмів-деструкторів та наявності макро- і мікроелементів в навколишньому середовищі. Але лімітуючим фактором у процесі біоочищення бурових стічних вод є нестача фосфору та кальцію, що є важливими елементами. Тому перспективним є використання ФГ як доступного джерела цих елементів.

Дослідження [78] виявило, що використання 1,0% мас. ФГ під час культивування протягом трьох днів призвело до зниження ступеня руйнування карбоксиметилцелюлози та поліакриламід у бурових стічних водах на 66,8% порівняно з контролем, досягаючи показника 99,8%. Проте цей метод потребує подальшої розробки та оптимізації, оскільки його впровадження у промислових масштабах потребує активації біологічної складової процесу з урахуванням усіх фізико-хімічних властивостей матеріалу біорозкладання.

Ще одним напрямком використання ФГ є його використання в біотехнологічних процесах нейтралізації осадів стічних вод. У роботі [79] був описаний спосіб очищення осаду стічних вод у системах анаеробного бродіння з осадженням важких металів у складну сульфідну фракцію за допомогою біогенного сірководню – продукту життєдіяльності сульфатредукторів, де ФГ є мінеральною добавкою для інтенсифікації розвитку бактеріальної культури. Проте для збільшення продуктивності біореактора та переведення процесу

очищення в безперервний необхідна іммобілізація бактерій на мінеральному носії, щоб зменшити винос біомаси з біореактора.

Альтернативною перспективою утилізації ФГ є анаеробне зброджування з одночасним відновленням сульфатів. Згідно з дослідженням авторів [80], види *Desulphovibrio* є потенційними кандидатами для біоремедіації ФГ за допомогою іммобілізації металів та металоїдів за рахунок утворення сульфідів, що також досліджено в роботі.

Біотехнології переробки складних органічних речовин можуть бути успішно використані для розкладання органічних відходів з утворенням летких жирних кислот та вуглекислого газу, як у анаеробних, так і у аеробних умовах. Одним з перспективних напрямів досліджень є розвиток біохімічного процесу перетворення фосфорної сировини на фосфатні добрива.

Шляхом поєднання вже наявного накопиченого ФГ зі впровадженням нових технологічних рішень з переробки фосфорної сировини, можна знизити рівень техногенного впливу ФГ на довкілля. У цьому науковому дослідженні запропоновано модель, яка відображає комплексний підхід до створення екологічно чистого виробництва та переробки ФГ (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Модель комплексного підходу до утворення та утилізації фосфогіпсу

Варто відзначити, що використання комплексного компосту на основі ФГ, суперфосфату, гною та рослинних решток у рекультивованому ґрунті дозволяє знизити вміст рухомих форм важких металів (Co, Mn, Cu, Ni, Pb) на 60-70% або більше протягом року завдяки переведенню важких металів у важкодоступні для рослин форми органічних комплексів та солей металів [81]. Фосфогіпс можна розглядати як кислотостійкий мінеральний носій, що додатково є джерелом макро- та мікроелементів для процесу росту необхідних еколого-трофічних груп бактерій. Як іммобілізуючий носій зі зміненою поверхнею, ФГ характеризується низькою пористістю, але на поверхні гранул утворюється стійка біоплівка. Тому, ФГ є перспективним для використання як іммобілізаційний носій для бактерій у біореакторах.

## **Висновки до розділу 1**

1.1 З урахуванням аналізу сучасних тенденцій досліджень очевидно, що наукова спільнота зосереджується на покращенні виробництва біопалива та екологічної ситуації в енергетичному секторі та регіонах. При порівнянні міжнародних та вітчизняних досліджень з інтенсифікації метанового бродіння можна відзначити, що міжнародні дослідження є більш комплексними і враховують всі аспекти системи в цілому. За допомогою кластерного аналізу вдалося визначити основні теми досліджень у галузі біоенергетики, такі як зміни в моделях розвитку біоенергетики, лісовідновлення, виробництво та застосування біопалива, а також вплив біоенергетичних технологій на довкілля.

1.2 Було здійснено моделювання тенденцій у поводженні з ФГ та визначення альтернативних рішень для його використання. Візуалізовано кластерні взаємозв'язки у наукових публікаціях різних галузей, щодо використання ФГ та його застосування в промисловості. Встановлено, що ефективно вилучення корисних та зв'язування токсичних компонентів під час переробки ФГ, має значний вплив на процеси валоризації цього матеріалу. Аналізуючи сучасні дослідження ФГ, було визначено, що характеристики компонентного складу дозволяють використовувати ФГ в різних напрямках



утилізації. Відтак, була розроблена концепція комплексного біохімічного підходу до питань поводження з ФГ. В рамках цієї концепції запропоновано біохімічну переробку ФГ, використовуючи біопроцеси та нові біотехнологічні рішення щодо переробки фосфорної сировини, що дозволить знизити техногенний тиск на навколишнє середовище.

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження

##### 2.1.1 Характеристика органічних відходів як сировини для переробки в біоенергетичних технологіях

На сьогодні в Україні спостерігається швидкий розвиток біогазових проєктів. За даними на кінець 2020 року, було запущено 27 біогазових проєктів [41]. Згідно з найсвіжішою інформацією на кінець 2021 року, в агропромисловому комплексі налічується 24 об'єкти з когенераційними установками на біогазі, а з полігонів і звалищ твердих побутових відходів – 26 об'єктів з когенераційними установками на біогазі [82].

Використання біогазових технологій сприяє розвитку сталого господарства та покращенню стану ґрунтів і екосистем. У процесі виробництва біогазу утворюється дігестат, який містить велику кількість органічних сполук та органічного вуглецю. Це дозволяє використовувати дігестат як біодобриво, замінюючи мінеральні добрива. Органічне добриво, яким є дігестат, сприяє активізації властивостей ґрунту щодо поглинання парникових газів і збільшення вмісту органічного вуглецю в ньому [83].

Прогнозовані значення потенціалів утворення різних видів відходів підтверджують перспективність їх використання для енергетичних цілей.

Україна має потенціал для використання платних та безкоштовних субстратів у виробництві біогазу. До платних субстратів належать рослинні відходи, такі як силосна кукурудза, цукрове сорго, цукрові буряки та солома зернових культур. Їхнє використання як монособстратів нерентабельне з економічних поглядів, тому вони використовуються як добавки до безкоштовної сировини для збалансування співвідношень речовини в процесі, стабілізації та прискорення виробництва біогазу.

До безкоштовних субстратів належать відходи тваринництва, харчової промисловості, органічна фракція муніципальних побутових відходів, органічний осад очисних споруд стічних вод підприємств та органічна фракція з полігонів твердих побутових відходів. Такі субстрати по суті є бешкоштовними, або виробники повинні платити за їх утилізацію.

Значна кількість безкоштовних субстратів отримана з відходів харчової промисловості, органічного осаду стічних вод та органічної фракції з полігонів ТПВ. Ці види сировини можуть бути використані як добавка до основного субстрату для врівноваження складу суміші та підвищення її ефективності.

Отже, використання різних видів сировини для виробництва біогазу має потенціал для зменшення антропогенного навантаження на довкілля. Такий підхід може бути корисним як з екологічної, так і з економічної точок зору, оскільки дозволяє використовувати відходи як вторинні ресурси та зменшувати витрати на їх утилізацію.

За розрахунками, частка біомаси, яку можна отримати з рослинних решток, таких як солома, кукурудза та стебла соняшника, для виробництва біогазу становить від 30% до 40% від загальної технічно доступної маси. Інформація про оцінку виробництва побічних продуктів та можливості виробництва біометану згідно з даними Державної служби статистики України. Варто відзначити, що зброджена маса решток повертається на поля, що компенсує їх втрату як поживної речовини. Загальний потенціал виробництва метану з врахуванням відходів та кукурудзяного силосу прогнозується на рівні 7800 млн  $\text{nm}^3$   $\text{CH}_4$  на рік. При цьому, рослинні рештки можуть забезпечити майже половину потенціалу виробництва біогазу, тоді як гній та послід разом покривають лише 11% загального потенціалу.

В Україні спостерігається тенденція до збільшення загального потенціалу рослинних решток, за рахунок підвищення урожайності сільськогосподарських культур, серед яких основний потенціал забезпечують солома пшениці (36,4%) та стебла кукурудзи (34,6%).

На рис. 2.1 складена блок-схема класифікації різних видів відходів, що містять органічні компоненти до даних [84, 85] для утилізації в енергетичних цілях.

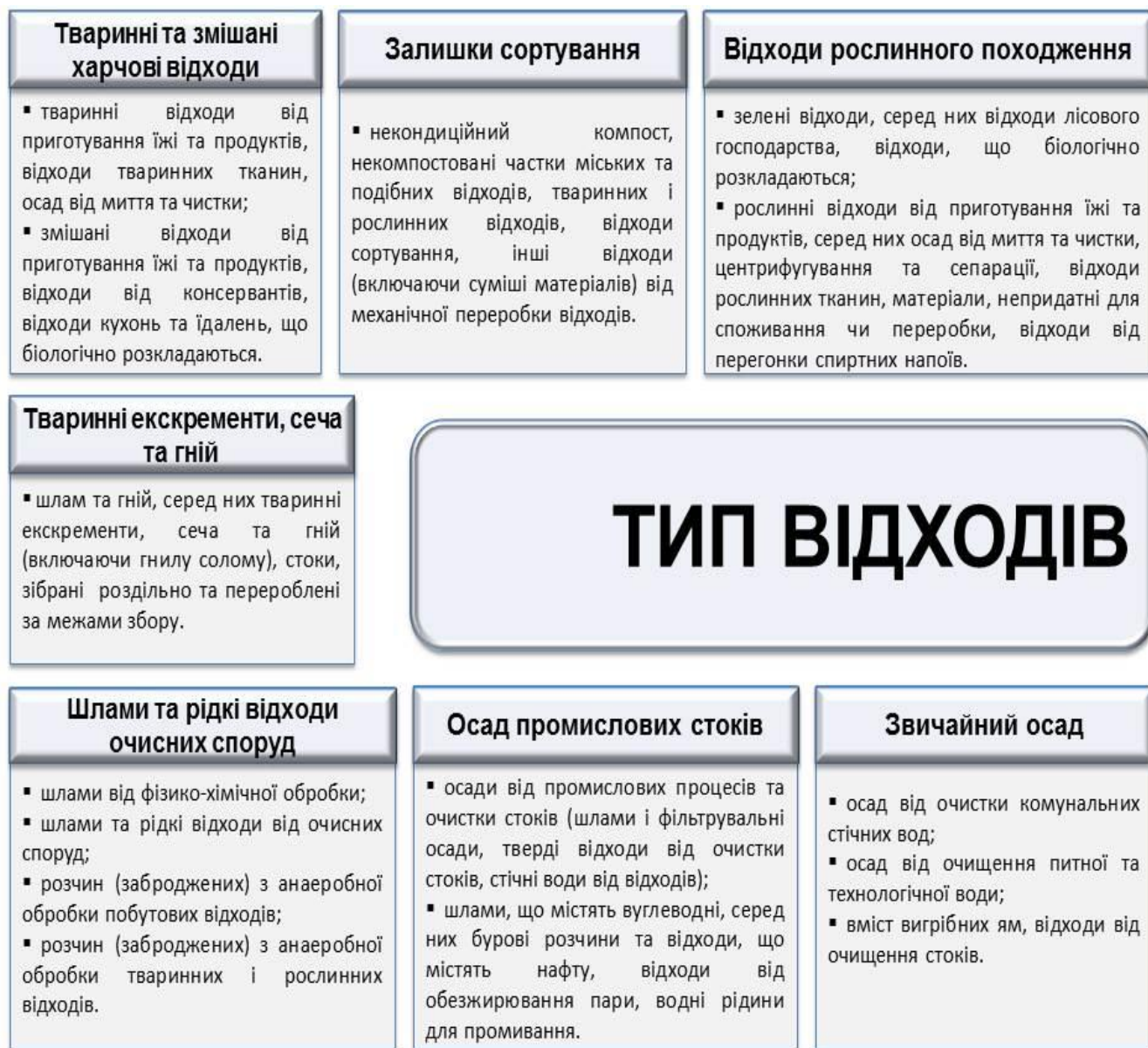


Рисунок 2.1 – Модель класифікації органічних відходів

Так, дігестат, який є продуктом анаеробного зброджування органічних відходів, містить значну кількість поживних речовин, таких як азот, фосфор та калій, що можуть бути використані як добриво для рослин. Крім того, дігестат містить мікроелементи, які є необхідними для росту та розвитку рослин, а також корисні бактерії, які можуть покращити ґрунтову флору та фауну.

Дігестат також може бути використаний як дієтична добавка для тварин. Він містить білки та амінокислоти, які можуть бути корисними для здоров'я та розвитку тварин, а також ензими, які допомагають забезпечувати нормальний розвиток рубця у худоби.

Отже, дігестат є важливим продуктом анаеробного зброджування органічних відходів, який може бути використаний як добриво та дієтична добавка, що дозволяє максимально раціонально використовувати побічні продукти сільськогосподарської діяльності та зменшувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Згідно з аналізом [86, 87] потенціалу виробництва біогазу в аграрному секторі України, постачальниками сировини для біогазових установок можна вважати приблизно 1,14 млн. голів великої рогатої худоби, 3,4 млн. свиней та 118,9 млн. голів домашньої птиці. З тваринного гною можна отримати до 2,9 млрд м<sup>3</sup> біогазу. Проте фрагментація українського аграрного сектора переважно на дрібні фермерські господарства та підприємства означає, що значна частина наявного потенціалу практично не використовується. Малі ферми стикаються з проблемами прибутковості та браком субстрату навіть для невеликих біогазових установок. Дослідження також відзначають, що понад 50% загального біогазового потенціалу (підприємств) розташовано в п'яти областях: Черкаській, Київській, Вінницькій, Дніпропетровській та Полтавській, що зумовлено рівнем розвитку тваринництва. Розрахований потенціал виробництва біогазу з гною може задовольнити 3,17% загальної потреби України в електроенергії або 2,28% потреби в природному газі.

Ці цифри підтверджують високий потенціал використання органічних відходів для виробництва енергії. Зокрема, рослинні відходи можна використовувати для виробництва біопалива, а екскременти тварин - для виробництва біогазу. Це дозволить знизити негативний вплив на довкілля та забезпечити додаткові джерела енергії для економіки. Однак, необхідно вирішувати проблеми збору, транспортування та переробки відходів, а також

забезпечення рентабельності виробництва енергії з використанням цих ресурсів, рис. 2.2.

За допомогою вбудованої функції «ТРЕНД» в MS Excel було побудовано прогноз з урахуванням змінних року (x) та обсягу курячого посліду в тисячах тонн на рік (y), на основі обраного інтервалу часу та статистичні дані. Відправною точкою для прогнозу був 2020 рік, а дані за останні 5 років до 2020 року були використані для «ретроспективного прогнозу» на 2020-2026 роки [88, 89]. При побудові прогнозу була обрана шкала часу з рівними інтервалами між точками даних – один рік, з вибором річних інтервалів на основі стану статистичних даних на перший день кожного року. Початковим роком для прогнозу був 2021 рік, і в цьому випадку для побудови «ретроспективного прогнозу» на 2021-2025 роки були використані дані за 6 років, що передували 2021 році.

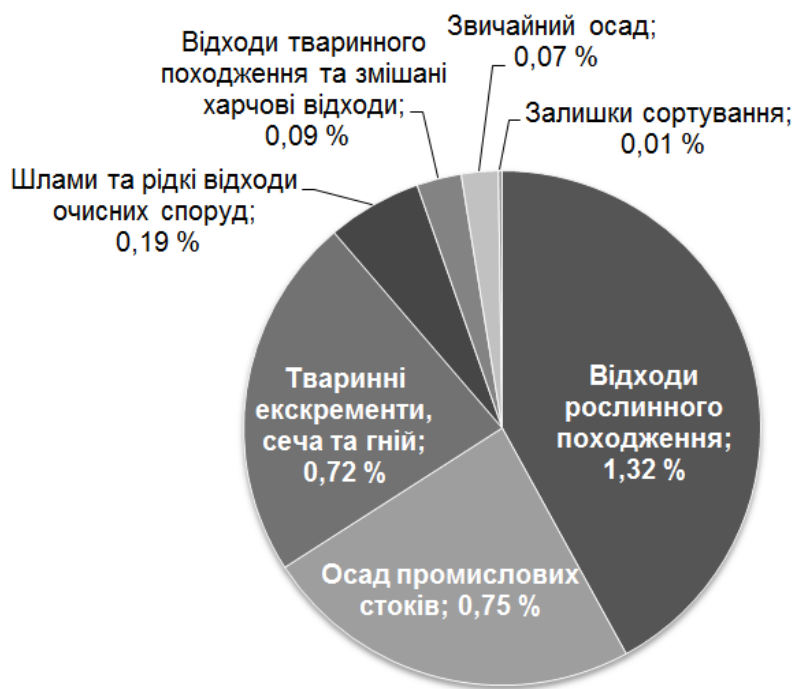


Рисунок 2.2 – Відсоток відходів, що містять органічні компоненти, від загальної кількості відходів, що утворюються в Україні станом на 2020 р.

Довірчий інтервал – це діапазон значень навколо кожного прогнозованого значення, який, ймовірно, міститиме фактичні точки даних, які відповідають прогнозу. Довірчий інтервал є мірою невизначеності, пов’язаної з прогнозом. 95% довірчий інтервал означає, що існує 95% ймовірність того, що фактичні точки

даних потраплять у діапазон значень, визначених прогнозом і пов'язаним з ним довірчим інтервалом.

У цьому випадку довірчий інтервал був обраний 95% для кожного виду відходів. Вибір довірчого інтервалу для кожного виду відходів ґрунтувався на відносному лінійному відхиленні річних обсягів відходів від середнього рівня утворення відходів за п'ять років, як показано в таблиці 2.1. Довірчі інтервали розраховували за допомогою вбудованої функції «CONFIDENCE» в MS Excel.

Таблиця 2.1

## Утворення органічних відходів в Україні

Вид відходів	Роки (n)					Середнє значення $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$	Середнє лінійне відхилення $\bar{r} = \frac{\sum  x_i - \bar{x} }{n}$	Відносне лінійне відхилення (довірчий інтервал прогнозу), % $v = \frac{\bar{r}}{\bar{x}} \cdot 100$
	2015	2016	2017	2018	2019			
Осад промислових стоків	3209,90	3919,80	3648,70	3630,30	3346,10	3550,96	218,368	± 6
Шлами та рідкі відходи очисних споруд	249,80	838,30	971,70	793,90	792,20	729,18	191,752	± 26
Відходи тваринного походження та змішані харчові відходи	897,00	990,60	587,60	607,50	441,00	704,74	191,248	± 27
Відходи рослинного походження	7742,30	8606,00	8782,30	7829,30	8068,60	8205,7	390,760	± 5
Тваринні екскременти, сеча та гній	4938,00	4288,70	3653,40	3233,80	3612,90	3945,36	534,392	± 14
Звичайний осад	397,60	693,60	515,10	643,50	563,30	562,62	85,016	± 15
Залишки сортування	35,60	81,90	63,2	63,60	69,20	62,7	10,840	± 17

Ураховуючи розмір довірчого інтервалу, були визначені нижня та верхня межі, які можуть бути використані як можливі сценарії прогнозування. При цьому нижня межа довірчого інтервалу може бути використана як негативний прогноз, що передбачає зменшення швидкості утворення курячого посліду, а верхня межа - як позитивний прогноз, що передбачає збільшення швидкості утворення курячого посліду.

Графічне зображення результатів прогнозування представлено на рис. 2.3, де лініями показано центральний тренд між нижньою та верхньою межами довірчого інтервалу.



Рисунок 2.3 – Прогнози потенціалу утворення різних видів відходів, що містять органічні компоненти [90]

Незважаючи на значні флуктуації фактичних показників утворення відходів, до 2026 року прогнози свідчать про стабільний щорічний рівень утворення відходів рослинного походження, екскрементів тварин, сечі, гною та промислового шламу. Детальний аналіз кожного з цих показників показує, що відходи тваринного походження та змішані харчові відходи з 2019 року мають тенденцію до стрімкого зменшення завдяки новим технологіям їх переробки, фізичному скороченню та переробці тваринних відходів. Однак, коли мова йде про осади та рідкі відходи від переробки відходів, динаміка скорочення цих видів



відходів значно повільніша через критичну ситуацію в Україні з переробкою та захороненням побутових відходів, осадів та рідких відходів з очисних споруд. Обсяг екскрементів тварин, сечі та гною відносно незначно скорочуватиметься протягом наступних п'яти років (2021-2026), що пов'язано не стільки зі скороченням відходів, скільки зі скороченням поголів'я худоби в аграрному секторі України. Обсяг рослинних відходів та осадів промислових стоків у прогнозованому періоді майже не змінюється, що пояснюється недостатньою увагою лісогосподарських та промислових підприємств України до екологічної складової своєї діяльності.

Дійсно, проблема утворення та накопичення відходів звичайного осаду є досить серйозною в Україні, особливо в контексті старіючого комунального господарства та необхідності модернізації і реконструкції водоочисних споруд. Збільшення кількості відходів звичайного осаду впливає на навколишнє середовище, зокрема на ґрунт, підземні води та поверхневі водойми, що може призвести до забруднення та порушення екосистем.

Одним з можливих рішень проблеми є впровадження сучасних технологій переробки та утилізації відходів звичайного осаду, таких як біологічна обробка, термічна обробка, використання в якості добрива, а також виробництво біогазу та електроенергії. Крім того, необхідно забезпечити ефективне фінансування та контроль за діяльністю водоочисних споруд та інших підприємств, які займаються утилізацією відходів.

Важливо зазначити, що проблема утворення відходів звичайного осаду є складною та потребує комплексного підходу від уряду, бізнесу та громадськості. Виконання заходів щодо зменшення кількості відходів та їх ефективної утилізації сприятиме збереженню навколишнього середовища та покращенню якості життя громадян.

Варто відзначити, що серед причин скорочення згаданих видів відходів до 2026 року, одним із факторів є активний розвиток екологічно чистих технологій, включаючи процеси анаеробного бродіння. Інноваційні розробки повинні бути

стимулом для скорочення всіх видів відходів у найближчі п'ять років (з 2021 по 2026 рік).

Відповідно до аналізу статистичної звітності підприємств, розвиток птахівництва за період з 1990 року до сьогоднішнього дня можна розділити на два етапи - спад виробництва птиці з 1990 по 1997 рік та поживлення виробництва з 1998 року до сьогодні [91].

### 2.1.2. Характеристика органічних відходів, що були взяті для дослідження

*Характеристика пташиного посліду.* Пташиний послід був наданий фермерськими та приватними господарствами. Зокрема було використано послід з місцевого фермерського господарства «Злак» (Сумська область, Україна) та чеського фермерського комплексу «Organicfarm» (Непомук, Чеська Республіка) (рис. 2.4). Перепелиний послід мав частинки розміром 0-1 мм. Значна частина поживних речовин (табл. 2.2) у посліді знаходиться у водорозчинній формі.

Таблиця 2.2

#### Характеристика перепелиного посліду

Параметр	Вимірювання
Суша речовина, %.	48,9
Азот загальний (N), %.	5,8
Масова частка органічної речовини в перерахунку на вуглець (C), %.	15,9
Масова частка загального фосфору (P), %	2,3
Вміст золи, %.	42,1
Середньоквадратичне відхилення даних	±0,2
Співвідношення C:N	2,74
pH	7,8



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд перепелиного посліду

Показники курячого посліду використаного в експериментах були на рівні вмісту нітрогену 10,65 г/кг, амонію 7,1 г/кг та показника хімічного споживання кисню (ХСК) 317,75 г/кг (рис. 2.5). Маса сирого пташиного посліду мала характеристики наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Фізичні властивості та елементний склад посліду

Вигляд, колір, запах	темно-коричнева, розсипчаста маса, зі специфічним запахом, з вкрапленнями піску
Масова частка води, %	50-65
Масова частка макроелементів, %:	
Азот	0,7
Фосфор	0,5
Калій	0,85
Кислотність	pH 7,5



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд курячого посліду

*Рослинні залишки.* В якості рослинного субстрату використовувався багаторічна трава з великим енергетичним потенціалом у екологічно безпечних технологіях виробництва біогазу - канаркова трава очеретяна (рис. 2.6). Канаркова трава очеретяна характеризується високою природною концентрацією та різноманітністю алкалоїдів, містить деякі антоціани, вміст лігніну, целюлози, золи. Показники, що контролювались, наведено в табл. 2.4.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд рослинних залишків

Таблиця 2.4

#### Характеристика канаркової трави (*Phalaris arundinacea*)

Параметр	Значення параметру
Суха маса	40,85
Загальна кількість твердих речовин, %	94,52
Летючі тверді речовини, %	91,12

#### **2.1.3 Характеристика фосфогіпсу як мінеральної добавки в анаеробному збродженні**

Фосфогіпс, що використовувався для досліджень відібрано з одного з масивів фосфогіпсу, який утворюється на території ПАТ «Сумихіпром», розташованого поблизу села Токарі (Сумська область). З метою збору даних для

проведення польових досліджень був проведений забір точкових проб ФГ з різних терас масиву відвалу та ґрунтових проб на території розміщення відвалу (див. рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Фосфогіпсовий відвал: а) точки відбору проб на території відвалу фосфогіпсу; б) зйомка у 2021 році, вересень: верхній майданчик фосфогіпсового відвалу, Сумська обл

Таблиця 2.5

Точки відбору проб із масиву відвалу фосфогіпсу і прилеглої території

Точки відбору проб	GPS координати
S1	50°55'03.3"N 34°57'33.2"E
S2	50°55'01.1"N 34°58'05.0"E
S3	50°55'14.3"N 34°58'07.1"E
1	50°55'07.3"N 34°57'46.3"E
2	50°55'06.6"N 34°57'44.1"E
3	50°55'06.1"N 34°57'42.3"E
4	50°55'05.6"N 34°57'39.8"E
5	50°55'08.6"N 34°57'51.0"E
6	50°55'05.5"N 34°58'03.0"E

З метою зниження техногенного навантаження на місцях складування та накопичення ФГ, та для забезпечення екологічної безпеки в регіоні, необхідно використовувати природні механізми фіксації важких металів та їх вилучення із біохімічних циклів кругообігу речовин. Це дозволить підвищити стійкість екосистеми та знизити негативний вплив на навколишнє середовище [92].

Свіжі насипи відвалу відрізняються тим, що на них відсутній рослинний покрив. На нещодавно засипаних схилах з субстрату, який складається з суглинку, можна спостерігати мозаїчність. Це означає, що на певній площі можуть зустрічатись поодинокі екземпляри рослинності, а на інших ділянках можуть бути зарості, що покривають до 1/3 поверхні.

Дигідратний ФГ у свіжому стані представляє собою частково зкомкований сіро-білий тонкодисперсний порошок з вмістом води 35-40%. Характерною властивістю цього порошку є його здатність утворювати грудки та злипатися протягом тривалого зберігання [93].

З часом у відвалі відбувається трансформація та зміна ФГ. У початкових стадіях спостерігається переважання процесів дегідратації та фізико-хімічного ущільнення, що призводить до утворення більш щільного осаду та зниження вологості ФГ до рівня 12-30% (залежно від тривалості зберігання та рівня тераси).

Дигідратний ФГ є механічно зруйнованою гірською породою, що оброблена  $H_2SO_4$  та вапняним розчином після екстракції оксиду фосфору (V). Переважна кількість часточок має розмір від 0,15 до 0,20 мм (65-70%). Склад ФГ характеризується значним вмістом нерозчинних малогідратованих сполук, таких як  $CaO$ ,  $SO_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ , які не утворюють взаємних агрегатів або структурних складів в чистому вигляді.

Для ФГ, що лежав у відвалі, залежно від тераси складування значення рН склали від 3,34 до 7,35 залежно від віку тераси (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Значення рН водної витяжки зразків фосфогіпсу

Номер місця відбору проб	1	2	3	4	5	6	S1	S2	S3
Значення рН	7,35	7,16	6,51	6,44	6,63	6,30	6,37	5,95	6,59

На рис. 2.8 представлений елементний склад проаналізованих зразків фосфогіпсу у відповідності до терас масиву відвалу.

У ФГ значна частка маси складається з кальцію, який зустрічається в масовому показнику від 391 мг/г для свіжого ФГ з верхнього майданчика до

236 мг/г для ФГ з V тераси. Також ФГ містить сірку (від 155 мг/г для свіжого ФГ з верхнього майданчика до близько 125 мг/г для ФГ з I, II, III та V терас), домішки кремнію (від 8,3 мг/г для свіжого ФГ з верхнього майданчика до близько 5 мг/г для ФГ з IV та V терас), натрію (від 6,4 мг/г для ФГ з II тераси до близько 3,5 мг/г для ФГ з III та IV терас), фосфору (від близько 2 мг/г для свіжого ФГ з верхнього майданчика та V тераси до 1,5 мг/г для ФГ з II тераси) та інші домішки (мікроелементи, важкі метали тощо), вміст яких менше 1 мг/г. Вміст окремих елементів у складі домішок, таких як алюміній та залізо, значно коливається.

Зберігання ФГ у відвалі призводить до переходу напівгідратного гіпсу до дигідратної форми. Основною кристалічною фазою відвального ФГ є сполуки гіпсу ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) та  $\text{CaPO}_4(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , що містяться у значних кількостях [94].

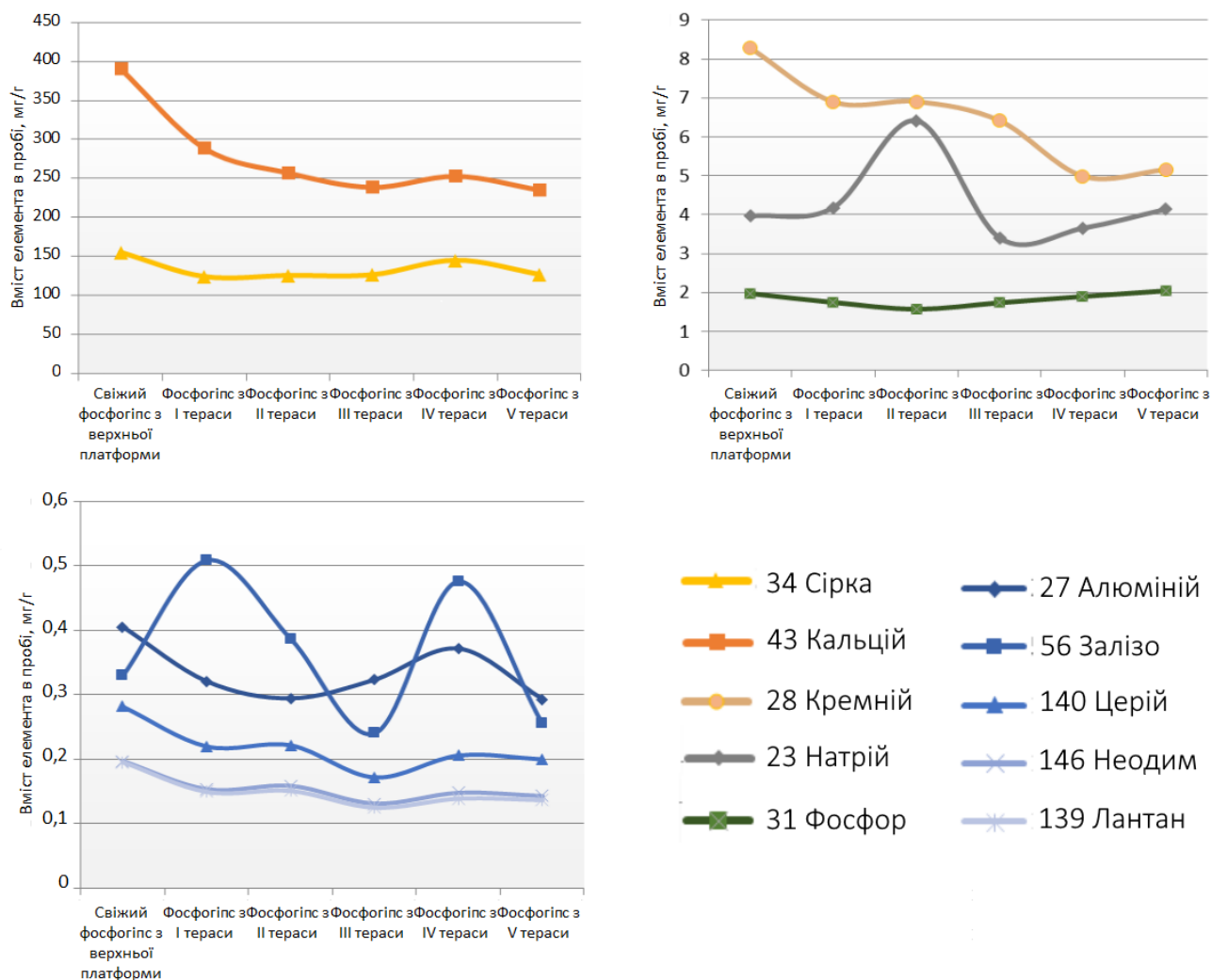


Рисунок 2.8 – Елементний склад проаналізованих зразків фосфогіпсового відвалу

Так, тонко розмелені частинки ФГ, які мають високу мінеральну дисперсність, можуть утворювати колоїдні розчини. У таких розчинах частинки ФГ мають розмір порядку нанометрів, що робить їх невидимими для ока та невідчутними на дотик. Завдяки цьому, такі колоїди мають специфічні властивості, зокрема, малу швидкість дифузії, що обумовлено їх малим розміром та зарядом поверхні. Крім того, неврівноважена розчинність та неможливість проникнення через тонкопористі мембрани клітинних структур організмів також характерні для колоїдних розчинів ФГ. Отже, ці властивості можуть ускладнювати процеси взаємодії ФГ з живими організмами та обумовлювати його вплив на довкілля.

Фтор має властивість швидко зв'язуватись з іншими елементами та сполуками, що зменшує його концентрацію у відвалах ФГ з плином часу. Однак, у свіжому ФГ, отриманому з фосфатної породи, можуть міститись значні кількості фтору. Характерно, що фтор майже повністю знаходиться у формі флюорapatиту, який є стійким до вимивання та не виходить у повітряну або ґрунтову воду. Однак, в процесі складування ФГ у відвалах можливе накопичення більш розчинних сполук фтору, таких як фториди, які можуть виходити з відвалів та негативно впливати на навколишнє середовище.

Так, це може бути однією з причин збільшення кількості сполук заліза на IV терасі. У процесі змивання та вимивання з верхніх терас можуть потрапляти різноманітні речовини, у тому числі і залізо, яке може осідати на IV терасі. Крім того, відновлення тераси може призводити до перемішування шарів ґрунту, що може також сприяти відкладенню заліза на IV терасі.

Як представлено на рис. 2.9, загалом, субстрат з суглинком та мінеральними частками ФГ служить для створення сприятливих умов для життєдіяльності мікроорганізмів та рослин, що сприяє розкладанню ФГ та зменшенню його негативного впливу на довкілля. Розкладання ФГ здійснюють мікроорганізми шляхом біологічного окислення та редукції сполук фосфору, а також за допомогою рослин, які здатні забирати сполуки фосфору з ґрунту та використовувати їх для свого росту та розвитку.





Рисунок 2.9 – Процес заростання фосфогіпсового відвалу, 2021 р.

Так, біохімічні процеси, що відбуваються в ризосферному шарі, дійсно характеризуються вилученням специфічного елемента з мінералів субстрату та їх обмінною вбирною здатністю. Ризосферні мікроорганізми та рослини продукують різноманітні органічні кислоти, які можуть взаємодіяти з мінеральними частинками ФГ та інших компонентів субстрату, що призводить до їх розчинення або заміщення іонів мінералу прикореневими іонами. Крім того, деякі ризосферні мікроорганізми можуть поглинати з ФГ сполуки кремнію, сірки та заліза, що сприяє їх доступності для рослин. Ці процеси допомагають підтримувати родючість рекультивованих ґрунтів та підвищувати їх продуктивність.

Основу взаємодії мінеральних компонентів ФГ з ґрунтовим субстратом становлять процеси розчинення цих компонентів мінеральними кислотами, корневими виділеннями рослин, перетворення мікроорганізмами та вплив органічних кислот, а також взаємодія фосфогіпсових компонентів з позаклітинними сполуками.

Отже, можна стверджувати, що ФГ відноситься до IV класу небезпеки, оскільки не містять високотоксичних речовин, які можуть пригнічувати функціонування мікроорганізмів у біопроесах. Але необхідно враховувати генезис ФГ, тобто технологічний процес в якому він утворюється та сировину, що при цьому використовується (апатити, фосфорити). Це впливає на вміст домішок,

зокрема токсичних, таких як важкі метали та радіонукліди, тому не весь відвальний ФГ може бути використаний як мінеральна добавка до анаеробного збродження. Попередньо його якість та екологічну безпечність необхідно оцінити та за необхідності здійснити доочищення та фіксацію в нерозчинній формі поліютантів.

Важливо зазначити, що додавання ФГ

може бути застосоване в різних процесах біоконверсії, як анаеробних, так і аеробних, з метою стимулювання росту різноманітних видів бактерій. Це дозволяє підвищити вивільнення фосфату в розчин, а згодом його осадження з використанням реагентів, що призводить до отримання високоякісного комплексного органо-мінерального добрива.

## **2.2 Експериментальні установки дослідження**

### **2.2.1 Установка електроферментації для сумісної обробки органічних відходів разом із фосфогіпсом**

На рисунку 2.10 зображений біореактор, який поєднує в собі функції електролізної установки. Реактор має форму ємності, в якій здійснюється анаеробне збродження органічної суміші. Кришка реактора обладнана газовим виходом, катодом та електродом. Основним завданням реактора є не тільки створення умов для анаеробного збродження, а й проведення електролітичної обробки субстратів протягом процесу реакції. У ролі катода та анода використовуються графітові стрижні, які знаходяться у різних частинах реактора та розділені мембраною у співвідношенні 2/3 об'єму для катодної частини та 1/3 об'єму для анодної частини. Для забезпечення контролю над процесом збродження, кожна частина реактора має окремий вихід для відбору проб.

Обробка електричним струмом проводилася шляхом підключення до електродів джерела живлення, що подає на них силу струму 20 А в діапазоні від 1 до 10 хвилин 1 раз на добу.

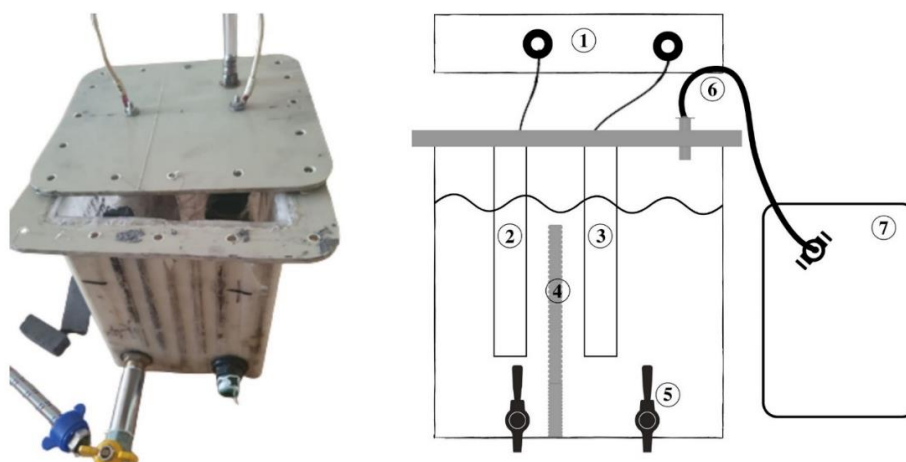


Рисунок 2.10 – Лабораторний стенд біореактора, скомбінований з електролізною коміркою: 1 – джерело живлення, 2 – анод, 3 – катод, 4 – напівпроникна мембрана, 5 – кран для відбору проб, 6 – кран для виходу біогазу, 7 – газгольдер

Наповнення біореактора субстратом та інокулятом досягає до 75% об'єму його ємності. Анаеробний процес розпочинається після завантаження сировини до біореактора та відбувається в умовах відсутності світла та за мезофільного температурного режиму. Протягом періоду газоутворення склад біогазу аналізується за допомогою газоаналізатора Geotech BIOGAS 5000.

### 2.2.2 Ультразвукова установка попередньої обробки органічних відходів разом із фосфогіпсом

На рис. 2.11 зображена експериментальна лабораторна установка для проведення ультразвукової (УЗ) обробки. Ультразвукове обладнання складається з трьох перетворювачів, розміщених в секції, і має потужність 200 Вт та частоту 30 кГц. Час УЗ обробки становив 3 хвилини, а час обробки тестувався в діапазоні від 1 до 6 хвилин.

Рідка фаза речовини вливається в ємність обробки через спеціальні отвори, рівномірно розподіляючись по площі поперечного перерізу об'єму УЗ камери. У процесі роботи установки відбувається генерація ультразвукових коливань,

вектор розподілу яких є перпендикулярним до поверхонь плавних переходів. Таким чином, внутрішній об'єм резервуара наповнюється ультразвуковим полем достатньої інтенсивності для створення та підтримки прогресивного режиму кавітації в усьому об'ємі резервуара.

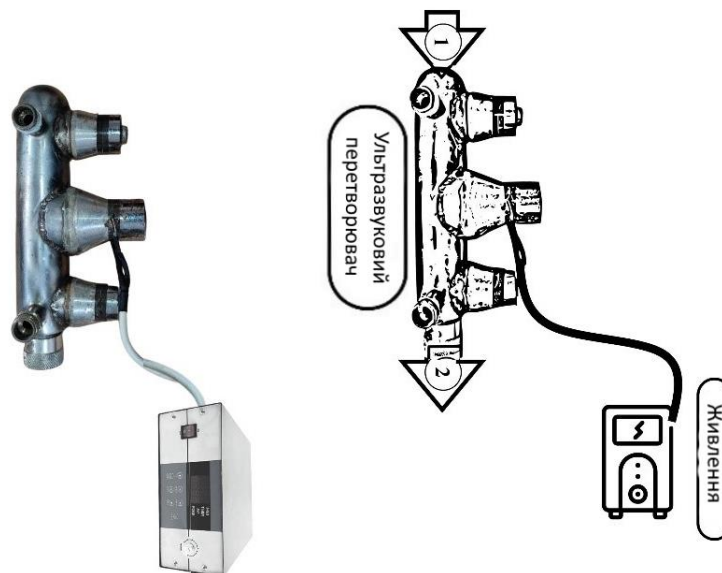


Рисунок 2.11 – Лабораторна установка ультразвукової обробки:

1 - завантаження зразків рідкої фази для попередньої обробки; 2 - відбір проб після ультразвукової обробки

Відслідковування параметрів процесів інтенсифікації анаеробного збродження проводилось шляхом контролювання значень показників рН, окисно-відновного потенціалу (ОВП), загальної мінералізації речовини (TDS) та складу біогазу як якісних, так і кількісних компонентних характеристик [95].

### 2.2.3 Експериментальна установка анаеробного збродження відходів

На рис. 2.12 зображено експериментальний стенд є устаткуванням для проведення процесу анаеробного бродіння. Він складається з чотирьох біореакторів, які є герметичними ємностями з хімічно стійкого скла. У цих біореакторах відбувається процес анаеробного збродження рідини. Біогаз, який утворюється в процесі збродження, збирається в газовідбірні пакети за допомогою газовідвідних трубок.

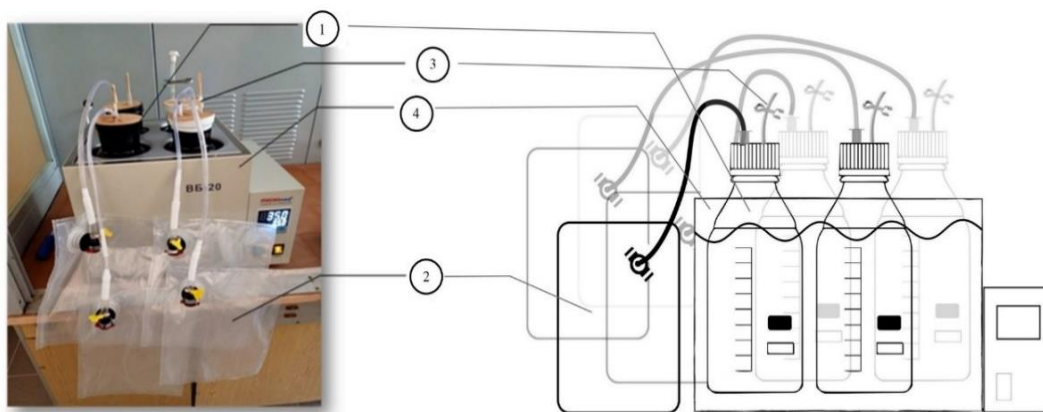


Рисунок 2.12 – Лабораторна установка звичайного біореактора: 1 – скляні біореактори; 2 – газовідбірні пакети; 3 – патрубки для відбору рідких проб; 4 – корпус водяної бані

Також у верхній частині реакторів є патрубки для відбору рідких проб для контролю фізико-хімічних показників процесу збродження. Щоб забезпечити постійну температуру на рівні 37°C, біореактори було розміщено у водяну баню. Таким чином, цей стенд дозволяє проводити експерименти з анаеробним збродженням та моніторингом фізико-хімічних показників процесу.

## 2.3 Методи дослідження

### 2.3.1 Комплексна методика проведення еколого-біохімічних досліджень утилізації фосфогіпсу в біоенергетичних технологіях переробки органічних відходів

Формалізація концепції використання ФГ в межах запропонованого біохімічного підходу наведена на рис. 2.13. Додавання ФГ безпосередньо в процес анаеробного зброджування органічних відходів може впливати на виходи біогазу, зокрема метану та біогідрогену, і тим самим збільшити енергетичний потенціал процесу. Крім того, у продуктах анаеробної трансформації утворюються окремі компоненти ФГ та нові мінеральні і органічні сполуки, які мають корисні властивості для використання у технологіях відновлення ґрунтів.

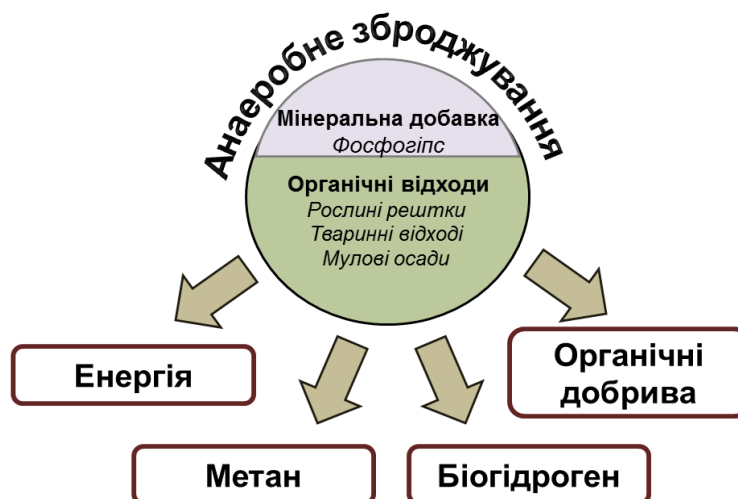


Рисунок 2.13 – Біохімічний підхід до використання потенціалу фосфогіпсу як мінерального ресурсу у процесі анаеробного збродження органічних відходів



Рисунок 2.14 – Блок-схема комбінування методів досліджень

На рисунку 2.14 наведена розроблена комбінація основних методів, використаних під час реалізації досліджень процесів утилізації ФГ.

Згідно з розробленою схемою комбінування методів, варто відзначити належний перетин між блоками досліджень щодо окремих технологічних рішень. Взаємозв'язок між блоками проявляється у суміжних сферах використання мінеральних носіїв із ФГ в біопроцесах, як це видно з таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Послідовність проведення експериментальних та теоретичних досліджень

<b>Послідовність експериментальних досліджень</b>	<b>Проведення теоретичних досліджень</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– розроблення методики і схеми проведення досліджень, з заданою точністю оптимальних умов проведення досліджень;</li> <li>– реалізація серії експериментів, з визначними технологічними та режимними параметрами у кожному досліді;</li> <li>– обробка та аналіз результатів вимірювань, прийняття рішень.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– біохімічна та математична формалізація з урахування критеріїв оптимізації, на основі кінетики процесів;</li> <li>– визначення величини констант процесів з урахування впливу біотичного компоненту;</li> <li>– формалізація закономірностей впливу попередніх обробок та ФГ як вторинного ресурсу на процес анаеробного збродження.</li> </ul>

В табл. 2.8 наведено співвідношення субстратів, що використовували в лабораторному експерименті для виробництва біогазу шляхом анаеробного зброджування в реакторі періодичної дії за рН 7,0 та 37 °С. Розрахунок пропорцій для анаеробного процесу у співвідношенні субстрат до інокуляту здійснювався відповідно до стандартної методики, що використовується в країнах ЄС, а саме VDI-RICHTLINIEN 4630 «Ферментація органічних матеріалів. Характеристика субстрату, відбір проб, збір даних про матеріал, випробування ферментації» (Engl. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2016) [96].

Розраховано вміст мінеральної добавки на суху масу субстрату до анаеробного зброджування для аналізу виробництва біогазу, виходу метану, якості та концентрації елементів у дигестаті до та після процесу анаеробного зброджування. Також визначено варіації доз ФГ (2,5, 5 % та 15 %), що було обрано згідно ЄС нормативів регулювання вмісту хімічних елементів в дигестатах як органічному добриві, а саме вимогам, встановленим Регламентом (ЄС) 2019/1009 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року. Крім того, це дозволило співставити отримані результати із впливом інших мінеральних добавок, що стандартно вносяться під час анаеробного збродження у таких співвідношеннях (5 та 15 % від сухої маси зброджуваних органічних відходів).

Таблиця 2.8

## Досліди з добавками фосфогіпсу: вихідні субстрати

	Загальний об'єм біореатора	Курячий послід	ФГ		Загальний об'єм біореатора	Рослинні рештки	ФГ	
			5%	15%			5%	15%
Маса субстрату для ферментації, г	1000	9	0,11	0,34	1000	27,23	1,29	3,86
Суша речовина (TS), %	1,24	24,88	100		6,63	94,52	100	
Органічна суша речовина (VS, оTS), %	0,89	20,2	-		5,00	91,8	-	
Органічна суша речовина до сухої речовини, %	72,03	81,19	-		75,37	97,12	-	
pH	7,2	5,7	7,16		8,04	-	7,16	

Параметри, які визначалися на початку і в кінці процесу зброджування, включали pH і склад органічної речовини субстрату та інокуляту. Протягом усього процесу зброджування біогаз аналізували за допомогою лабораторного газоаналізатора для виявлення  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$  та  $\text{H}_2\text{S}$ . Отриманий після анаеробного зброджування біодигестат аналізували методом мас-спектрометрії з індуктивно



зв'язаною плазмою для визначення концентрації мікроелементів. Окрім того, проводилося мікроскопіювання кінцевого продукту біопереробки та були використані біоінформаційні бази даних, а саме KEGG та EAWAG-BBD, в процесах біохімічного моделювання [97, 98]. В таблиці 2.9 наведено характеристику приладів та зазначено похибки вимірювань параметрів контролю проведених досліджень.

Таблиця 2.9

## Характеристика вимірювальних приладів

Параметр	Прилад	Похибка вимірювання
pH	Lab Multimetr - HI5221-01	$\pm 0,01$ pH
ОВП	Lab Multimetr - HI5221-01	$\pm 0,2$ mV
TDS	Солеметр (TDS-метр) "TDS-3" (clone)	$\pm 2\%$
ХСК	Методика визначення ХСК в поверхневих та стічних водах	$\pm 40-800$ мг/дм <sup>3</sup>
Вологість	Chemical Analyses – Determination of dry matter and water content on a mass basis in sediment, sludge, soil, and waste – Gravimetric method (European Standard) TC WI :2003 (E)	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
Елементний склад фосфогіпсу	ICP-MS Instrument Technische Universität Bergakademie Freiberg	$\pm 2\%$
Композиція біогазу	Geotech BIOGAS5000	$\pm 0.5\%$

На рис. 2.15 відображено основні чинники, що впливають на ефективність процесів утилізації ФГ та продуктів на його основі в біотехнологіях.



Рисунок 2.15 – Чинники, що визначають ефективність процесів утилізації фосфогіпсу та продуктів на його основі (модифікованих гранул, біопрепаратів) в біотехнологіях

### 2.3.2 Методика нейромережевої реалізації Data Mining анаеробних процесів

Як модель нейрона було обрано бінарний пороговий елемент. Цей елемент обчислює зважену суму вхідних сигналів і формує сигнал на виході величиною 1, якщо ця сума перевищує певне порогове значення, і 0 – в іншому випадку [99]. Структурна модель технічного нейрона представлена на рис. 2.16.

Стан нейрона визначається за формулою.

$$S = \sum_{i=1}^n \varphi_i w_i, \quad (2.1)$$

де  $\varphi_i$  – безліч сигналів, що надходять на вхід нейрона,  $w_i$  – вагові коефіцієнти нейрона.

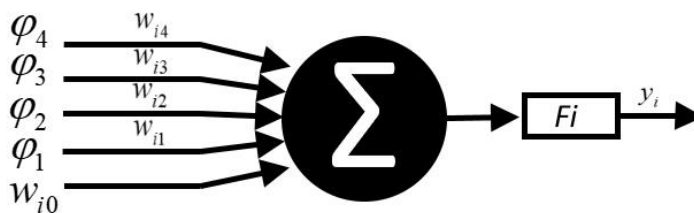


Рисунок 2.16 – Формальна модель штучного нейрона

Далі сигнал  $s$  перетворюється активаційною (передавальною) функцією нейрона  $F$  у вихідний сигнал  $y$ . Математично це можна виразити формулою:

$$y = F\left(\sum_{i=1}^n w_i \varphi_i + w_0\right), \text{ де } n - \text{розмірність вектора входів, } w_0 - \text{"нейронний зсув",}$$

що вводиться для ініціалізації мережі, під'єднується до незмінного входу  $+1$ ,  $F$  – активаційна функція нейрона.

У зв'язку з відповідністю відпрацьованості та функціональної надійності, для аналізу анаеробних процесів обробки пташиного посліду з електролізною та УЗ інтенсифікацією використовуються два види нейронних мереж (НМ): багатошаровий перцептрон та нейронних мереж радіально-базисної функції (РБФ). Інший вид використовуваної для Data Mining анаеробних процесів НМ - нейромережа на основі РБФ. Загальну формулу гаусового дзвона, яка визначає класичний закон функціонування осередків, подано на рис. 2.9.

Спрощення роботи і навчання досягається завдяки введенню замість прихованого шару нейронів шару РБФ комірок. Класичний закон, за яким такий осередок функціонує, визначається формулою гауссового дзвона:

$$g_j = \exp\left(\frac{-|x - t^j|^2}{\sigma_j^2}\right), \quad (2.2)$$

де  $x$  – вхідний вектор;  $t^j$  – вектор, що визначає математичне очікування (центр кластера в просторі ознак) РБФ комірки;  $\sigma_j$  – середньоквадратичне відхилення або параметр, який залежить від величини розкиду образів класу від

його центру. У цьому виразі евклідова відстань між векторами  $x$  і  $t^j$  обчислюється як

$$|x - t^j|^2 = (x_1 - t_1^j)^2 + (x_2 - t_2^j)^2 + \dots + (x_n - t_n^j)^2. \quad (2.3)$$

Осередки РБФ мережі навчають шляхом підбору центру і відхилення кожного з них. Для класифікатора як центр обирають центр кластера в просторі ознак, що компактно містить образи одного й того самого класу. У найпростішому випадку, якщо клас задано одним ідеальним образом, цей образ і буде вектором  $t$  – центром РБФ комірки.

Вихідний шар РБФ – мережі зазвичай складається з сумарних осередків:

$$y_k = \sum_{j=1}^h w_{jk} g_j. \quad (2.4)$$

Одним із таких універсальних засобів є STATISTICA Automated Neural Networks (SANN). Можливості такого інструменту автоматичного нейромережевого пошуку дають змогу використовувати систему не тільки експертам з НМ, а й новачкам у галузі нейромережевих обчислень.

На рис. 2.17 наведено розроблену схему комбінацій експериментальних методів дослідження з подальшим нейромережовим моделюванням.

Для формулювання прогностичних висновків було зібрано набір експериментальних даних процесів анаеробного зброджування з попередньою УЗ підготовкою та електроферментацією. За допомогою використовуваного математичного апарату в НМ відбувається створення моделі інтенсифікації анаеробних процесів за умов неповноти інформаційного базису, нелінійності процесів, розмитості даних отриманих на етапі експерименту. Паралельно використовується графічна візуалізація залежностей виходу метану в біогазі від параметрів обробки, і у порівнянні експериментальні дані з прогнозованими закономірностями дають можливість ухвалення ефективних рішень під час аналізу та прогнозування різних процесів.

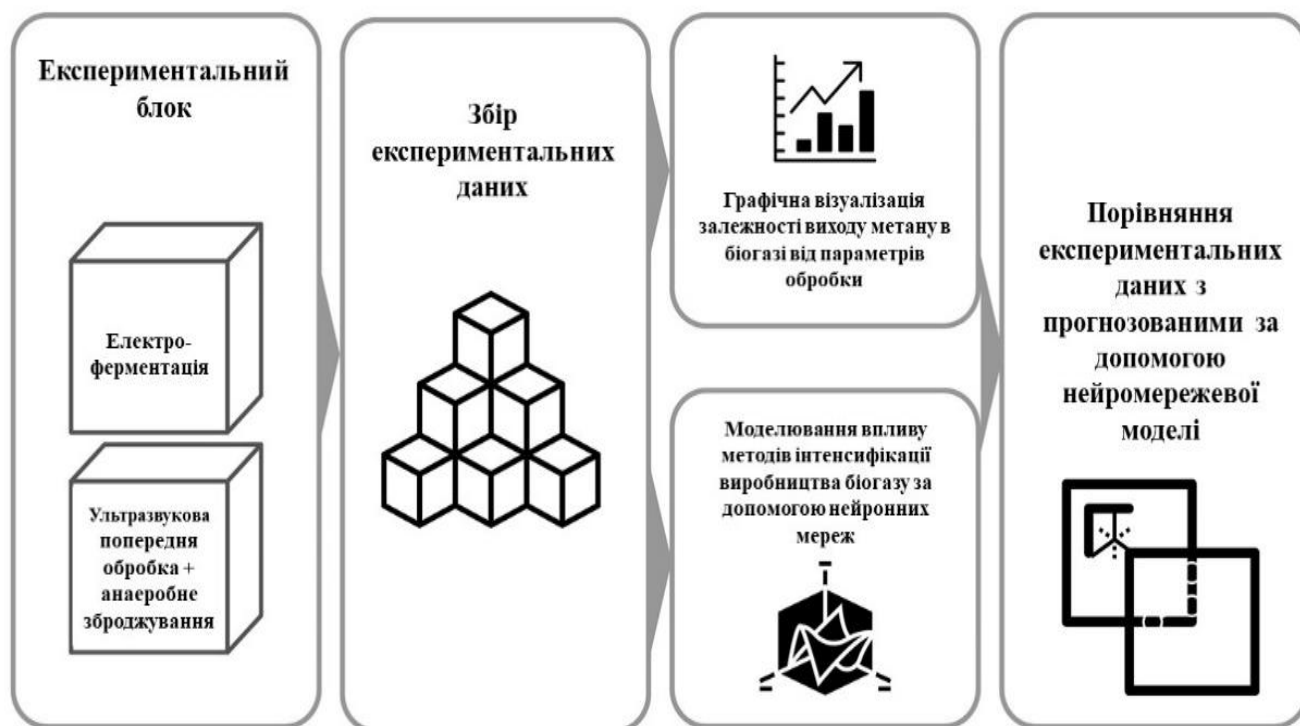


Рисунок 2.17 – Узагальнена методика реалізації моделювання реалізації енерготехнологій біопереробки відходів в серії експериментів

Сигмоїдальна функція для реалізацій Data Mining анаеробних процесів вибиралась виходячи із аналізу позитивних результатів аналогічних досліджень інших авторів та перш за все через здатність такої функції активації згладжувати значення досліджуваних величин, що має досить часто має місце при опрацюванні інформації щодо опрацювання субстратів у відповідних реакторах. При цьому сигмоїди дозволяють нейронам посилювати слабкі сигнали, і не насичуватися від сильних сигналів. Також важливим аспектом є те, що їх похідні можуть бути виражені через саму функцію і це дозволяє істотно скоротити обчислювальну складність методу зворотного поширення помилки, який також використовувався при аналізі анаеробних процесів.

Достовірність результатів, із застосуванням багатошарового перцептрона та нейромережі РБФ, перевірялась на основі широковживаного критерію - відносної середньоквадратичної похибки моделювання стосовно реальних даних, яка

експертно оцінювалась щодо технологічної прийнятності у контексті анаеробних процесів. При цьому для усунення негативного ефекту "перенавчання" нейромережі попередньо отримані експериментальні дані розподілялись на три вибірки: навчальну, тестову та контрольну. Нами були отримані, із технологічної точки зору, прийнятні значення такої середньоквадратичної похибки, тому інші варіанти оцінки достовірності результатів не застосовувались.

## **Висновки до розділу 2**

2.1 Для оцінки перспектив використання відходів з органічним компонентом в якості субстрату для анаеробного бродіння було проведено аналіз статистичних даних щодо утворення відходів в Україні та побудований прогноз на період з 2021 по 2026 роки. Зазначене дослідження дозволило виявити домінуючі типи відходів, які, як правило, лише збільшуються або майже не змінюються протягом цього періоду. Зокрема, до таких типів відходів належать шлами стічних вод, шлами промислових стоків, фекалії тварин, сеча та гній, а також рослинні відходи.

2.2 Досліджено екологічні властивості відвального матеріалу, і встановлено, що склад цього матеріалу змінюється та трансформується з часом залежно від розміщення на терасах. На території відвалу були зафіксовані варіації значень елементного складу та рівня рН, які коливалися від 3,34 до 7,35. Досліджено, що відвальний матеріал може бути використаний як мінеральний носій для корисних груп мікроорганізмів у біопроцесах детоксикації компонентів навколишнього середовища.

2.3 Було розроблено експериментально-методичний комплекс для реалізації процесів утилізації відходів в енергетичних цілях з використанням комбінації методів еколого-біохімічних досліджень утилізації відвальних матеріалів в біоенергетичних технологіях переробки органічних відходів. Дослідження проводилися на перетині між блоками досліджень з використанням окремих технологічних рішень.

## РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ СУМІСНОЇ ОБРОБКИ ВІДХОДІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦІЛЯХ

### 3.1 Дослідження процесу інтенсифікації виробництва біогазу за допомогою електроферментації із застосуванням нейромереж

Основним результатом порівняння динаміки виходу біогазу (рис. 3.1) з біореактора під час електролізної обробки та без неї є позитивний вплив електролізної обробки на кількість виходу біогенного газу.

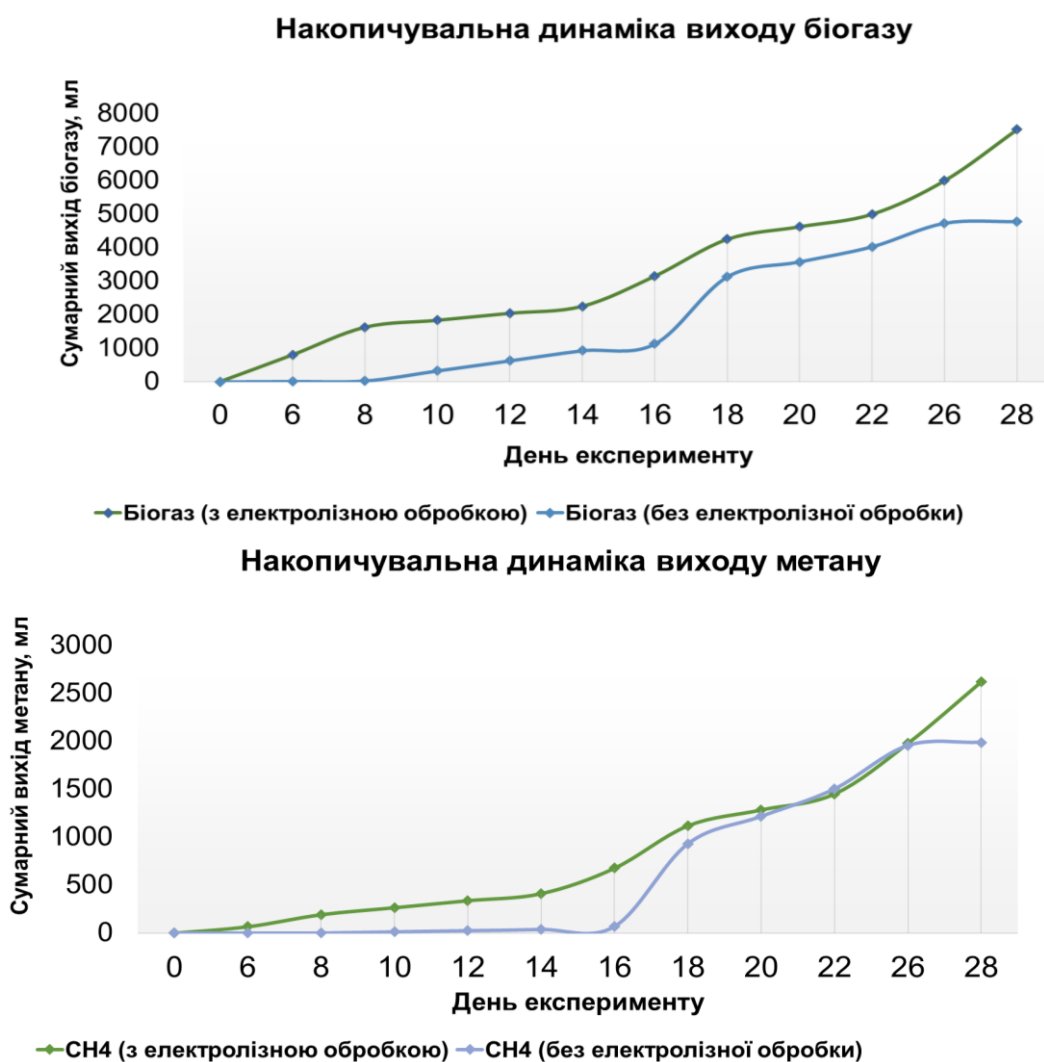


Рисунок 3.1 – Накопичувальна динаміка виходу біогазу та метану за стандартних умов та під час електроферментації субстрату разом із фосфогіпсом

Виявлено, що на гідролітичній стадії на 6-й день частка метану в біогазі з біореактора-електролізера становила 8,3%, а на 8-й день вона зросла до 15,3%, що значно перевищує стандартні показники, де на 8-й день відсоток метану в біогазі не перевищує 0,6%. На метаногенній стадії вихід метану в біогазі за стандартних умов збільшився до 68,7%, тоді як при електролізній обробці він не перевищував 53% (рис. 3.2). Проте, об'єм біогазу, який виходив з біореактора-електролізера на 28-й день, становив 1525 мл з 640,5 мл метану, тоді як при стандартних умовах на 28-й день вихід біогазу значно знизився до 50 мл, з яких 33,4 мл було метану. Це свідчить про те, що на 28-й день випуску біогазу у контрольному експерименті практично зупинився через вичерпання ресурсів легкодоступних органічних речовин для зброджування [100].

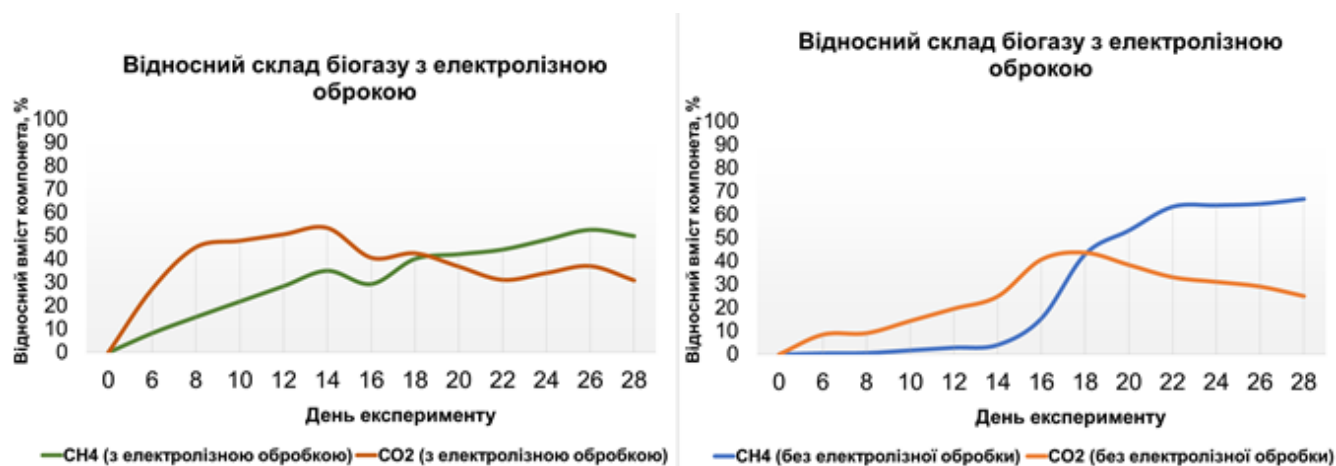


Рисунок 3.2 – Вихід метану та вуглекислого газу за стандартних умов та під час електроферментації субстрату разом із фосфогіпсом

Під час проведення електролізної обробки відбувається розклад накопиченої мікробної біомаси та важкорозчинних органічних сполук, що може позитивно вплинути на продуктивність біогазової системи [101]. Експерименти показали значне зменшення  $H_2S$  у біогазі під час електролізної обробки, ніж за стандартних умов анаеробного зброджування. У біореакторі-електролізері концентрація  $H_2S$  знизилася до 97 ppm на 26 день, тоді як у контрольних умовах залишалася понад 5000 ppm (рис. 3.3).



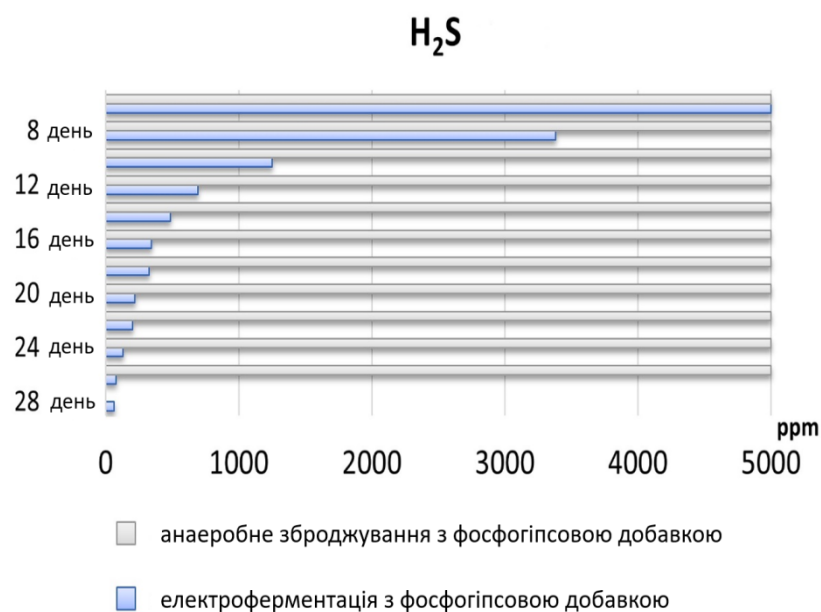


Рисунок 3.3 – Порівняння виходу сірководню в експериментах із застосуванням електричного струму для інтенсифікації виходу біогазу і без обробки

Під час гідролітичної деструкції у факультативно анаеробних умовах збільшується вихід CO<sub>2</sub>, а рН спочатку зміщується в лужний бік, але потім стабілізується на нейтральному рівні як під час електролізної обробки, так і у стандартних умовах (рис. 3.4).

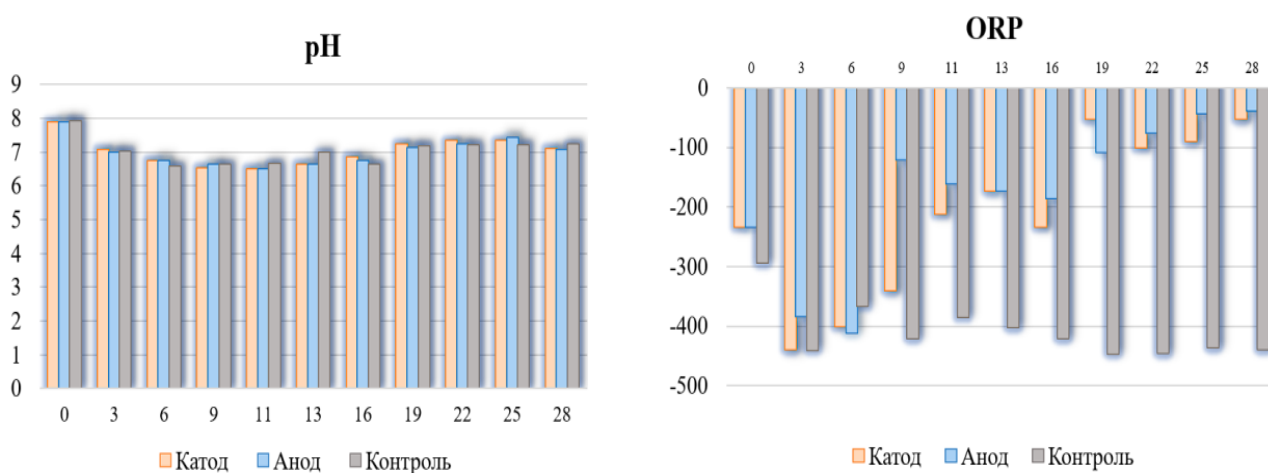


Рисунок 3.4 – Порівняльна характеристика зміни значень рН і ОВП в експериментах з комбінацією біореактора з електролізною обробкою (на катоді й аноді) і без обробки (контроль)

ОВП вимірювали до електролізної обробки з анодної та катодної зон, і в біореакторі-електролізеріан ОВП поступово зростала впродовж усіх етапів зброджування і на 28 добу набула значення  $-53$  мВ (рис. 3.4), що може свідчити про метаболічну активність мікроорганізмів метаногенної асоціації, що є позитивним показником під час реалізації електролізної обробки. У процесі нейромережевого Data Mining було використано комбінацію з 5 різних налаштувань, і якість результатів моделювання виявилась прийнятною – відносна якість репрезентації даних за всіма нейромережами становила від 52,8% до 93,1% (рис. 3.5).

The screenshot displays the 'SANN - Results: Контроль БГ' window. It features a table of active neural networks with columns for Net. ID, Net. name, Training perf., Test perf., Algorithm, Error funct., and Hidden act. Below this table are buttons for 'Select/Deselect active networks' and 'Delete networks'. Further down, there are options to 'Build more models with CNN' and 'Build more models with ANS'. The 'Predictions (MLP/RBF)' section includes a 'Predictions spreadsheet' with options for 'Predictions type' (Standalone, Ensemble, Standalone and ensemble) and 'Include' (Inputs, Absolute res., Targets, Square res., Output, Confidence, Residuals, Variables, Standard res.). A 'Summary' button and a 'Save networks' dropdown are also visible. A 'Sample' section has checkboxes for 'Train', 'Test', 'Validation', and 'Missing'.

Interfacial window Data Mining modeling management with use of automated neural networks STATISTICA

Statistical data for use of automated neural networks STATISTICA in intellectual analysis of data for management of anaerobic fermentation

Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Training error	Test error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	RBF 6-5-1	0.931113	1.000000	0.006953	0.026335	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
2	MLP 6-4-1	0.527238	1.000000	0.051419	0.030210	BFGS 1	SOS	Identity	Tanh
3	RBF 6-5-1	0.931113	1.000000	0.006953	0.026335	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
4	MLP 6-3-1	0.794545	1.000000	0.022461	0.028178	BFGS 3	SOS	Exponential	Exponential
5	RBF 6-5-1	0.931113	1.000000	0.006953	0.026335	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

Рисунок 3.5 – Інтерфейсне вікно Data Mining моделювання контролю анаеробної переробки з використанням STATISTICA Automated Neural Networks

У розділі про контроль анаеробних процесів та електроферментацію з додаванням ФГ, на рис. 3.6 та 3.7 показані площини візуалізації моделювання, які демонструють найкращу якість аналізу.

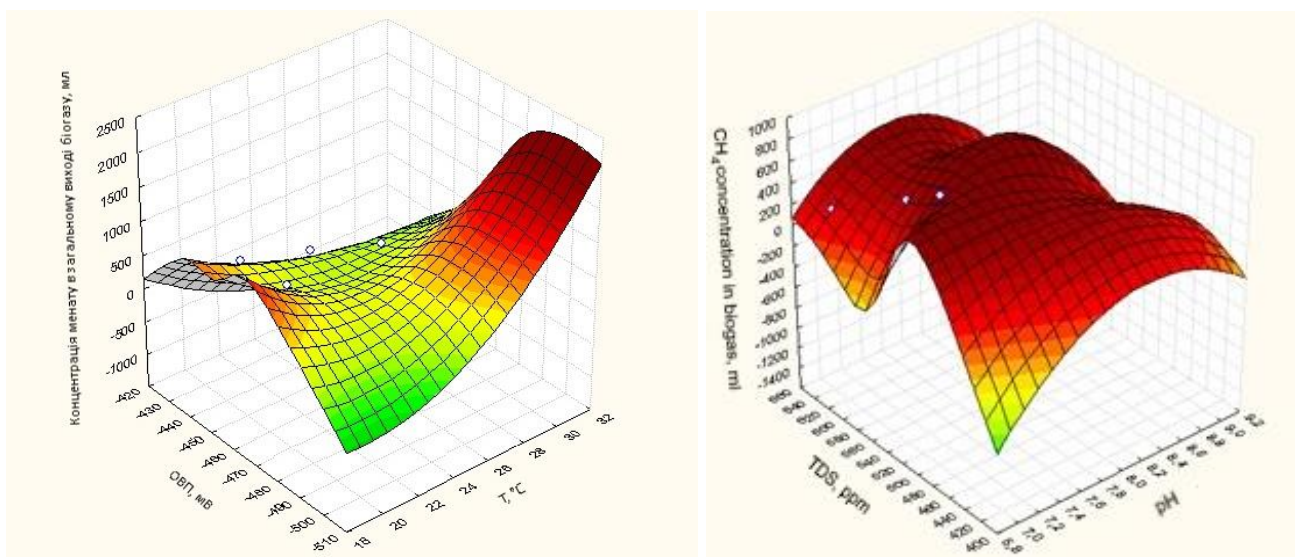


Рисунок 3.6 – Моделювання за допомогою НМ контрольного варіанта анаеробного зброджування без інтенсифікації процесу виробництва біогазу

Для цього була використана РБФ з одним прихованим шаром, яка включала 5 нейронів для анаеробних процесів та 6 нейронів для електроферментації. У процесі неймережевого Data Mining застосували ансамблю з 5 НМ, що були налаштовані різним чином. Отримана якість результатів моделювання була технологічно прийнятна з відносною якістю репрезентації даних від 48,3% до 100% за всіма неймережами.

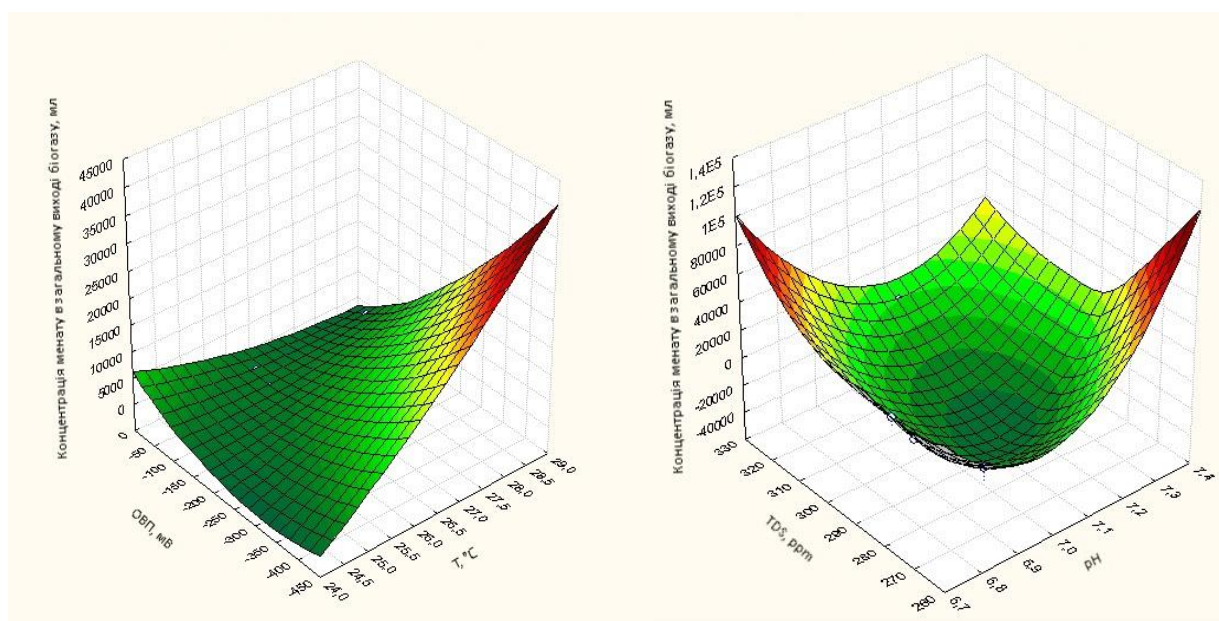


Рисунок 3.7 – Моделювання за допомогою НМ процесу електроферментації як методу інтенсифікації процесу виробництва біогазу

Для візуалізації моделювання анаеробних процесів контролю та електроферментації з додаванням ФГ було використано нейромережу, яка здійснює екстраполяцію за межі даних, що були зібрані експериментально. В процесі автоматизованого нейромережевого пошуку був продемонстрований синергетичний ефект дії електролізу разом з ФГ, що відображено параболічною площиною з піковими значеннями виходу метану в біогазу. При цьому підвищення мінералізованості субстрату досягає прогнозу до 80000 мл метану на добу порівняно зі стандартними умовами до 1000 мл метану на добу. Хоча це є екстраполяцією на великі обсяги виходу метану, це дозволило змоделювати синергетичний ефект електроферментації з додаванням ФГ до органічних відходів (рис. 3.7). При цьому коефіцієнти детермінації були узгоджені з експериментальними даними (0,971). Окремо, при статистичному аналізі експериментальної інформації, ймовірнісну природу зміни вхідних параметрів не враховували. Перш за все орієнтувались на вирішення задач апроксимації та інтерполяції наборів даних, які характеризуються нелінійністю – багатошаровий перцептрон та нейромережа РБФ якраз і є якісними математичними засобами для цього. Разом із тим останній вид нейромережі (РБФ) характеризується тим, що функція на її виході є суперпозицією Гаусових дзвонів, звідси можна стверджувати, що частково ймовірнісні властивості вхідних параметрів при Data Mining анаеробних процесів враховувалась.

### **3.2 Дослідження ультразвукої інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом із фосфогіпсом**

На рисунку 3.8 можна побачити, як змінюється структура полікристалів ФГ під час їх руйнування в акустичному полі. Значення рН та ОВП до та після УЗ обробки ФГ можна знайти в таблиці 3.1. Під впливом обробки тривалістю 6 хвилин форма кристалів в мінеральній структурі ФГ змінюється, утворюються кристали витягнутої форми з чистого гіпсу. Зазвичай, 3-хвилинна обробка досить для досягнення розміру частинок 10 мкм. Цей період УЗ обробки ФГ є найбільш

ефективним в заданих умовах для використання в технологічних розчинах анаеробного зброджування. Більшість попередніх досліджень зосереджені на використанні УЗ обробки ФГ в будівельній галузі, зокрема для покращення властивостей фосфогіпсового в'язучого та гідравлічної модифікації ФГ за допомогою цеоліту. У нашому дослідженні науково обгрунтовано потенціал використання УЗ для покращення здатності компонентів ФГ до біопроеесів, зокрема під час анаеробного зброджування органічних відходів. Варто зазначити, що склад ФГ залежить від сировини та технологічного процесу виробництва та потребує екологічної оцінки щодо прийнятності в біопроеесах. Досліджені зразки ФГ (Сумська область, Україна) є прийнятним для використання як добавки при анаеробному зброджуванні органічних відходів, так як не містять радіоактивних елементів, що підтверджено в Додатку Е. Щодо вмісту важких металів, тож обгрунтовано можливість фіксації важких металів в нерозчинну фракцію (судьфідів).

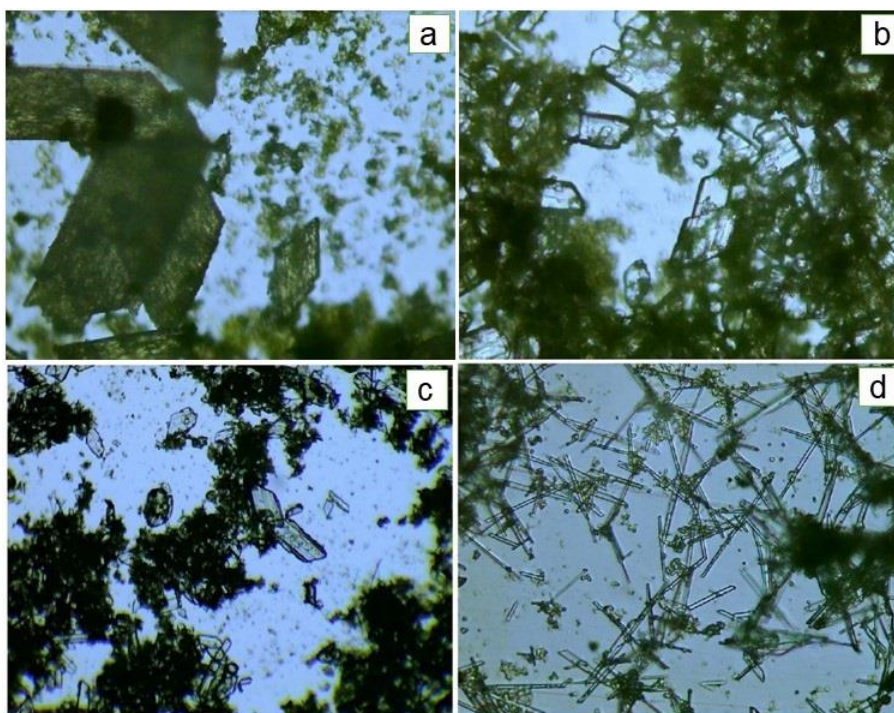


Рисунок 3.8 – Мікрофотографія фосфогіпсу в рідкій фазі, при концентрації 5 грамів на 200 мл водопровідної води, збільшення 40х: а) без обробки 200 мл, збільшення 40х, б) 1 хв. обробка 40х, в) 3 хв. обробка 40х, г) 6 хв. обробка 40х, збільшення 40х

Таблиця 3.1

## Зміна параметрів рідкої фази обробленого ФГ

Склад	Об'єм води	Час	pH <sub>0</sub>	ОВП <sub>0</sub>	pH	ОВП
ФГ 5 г	200 мл	1 хв	5,53	141	4.22	278
		3 хв	5.53	141	4.77	261
		6 хв	5,53	141	5.24	252
	100 мл	1 хв	2,6	329	2.84	338
		3 хв	2.6	329	2.86	350
		6 хв	2,6	329	2.69	378

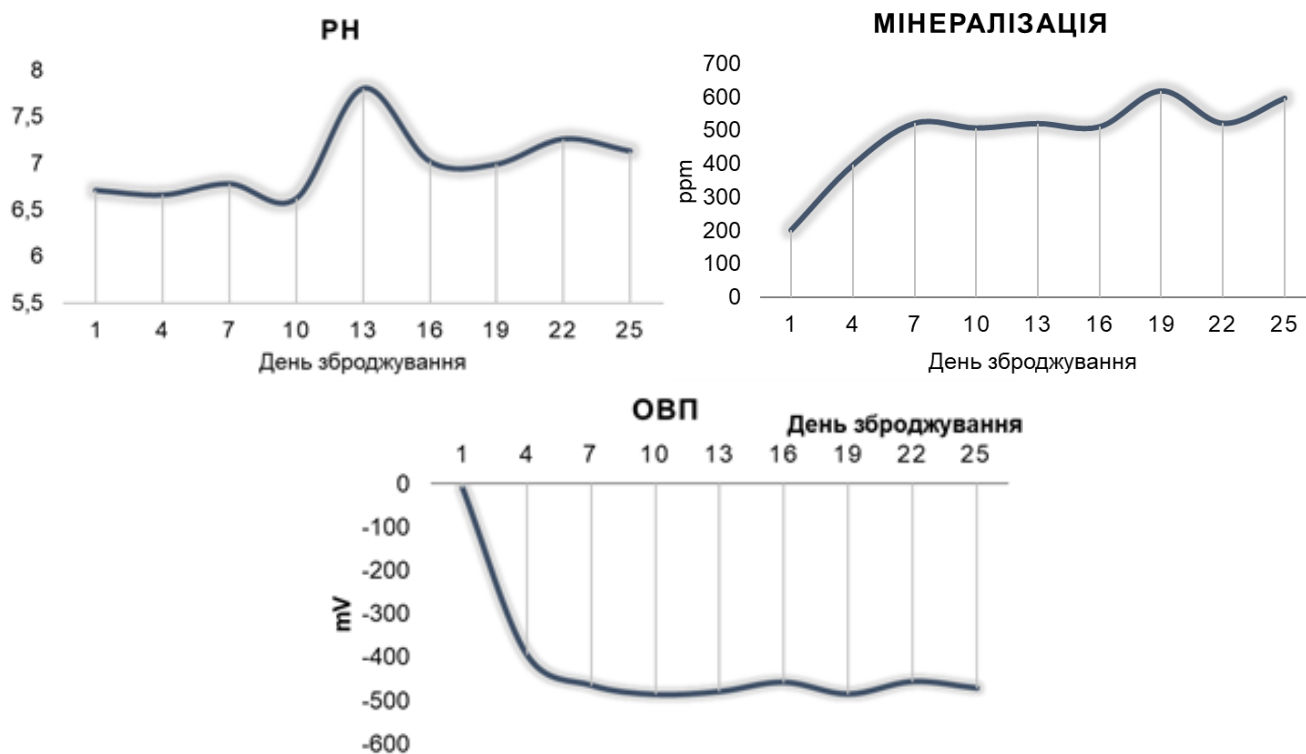


Рисунок 3.9 – Динаміка фізико-хімічних показників в процесі анаеробного збродження пташиного посліду попередньо обробленого ультразвуком

З графіку (рис. 3.9) видно, що в біосистемі анаеробного реактора ОВП зменшується на 5-й день збродження до значень -400-(-500) мВ, що свідчить про досягнення стійкого анаеробіозу. Такі стійкі значення ОВП дають можливість метаногенезу стійко розвиватись. На 6-7 день рН досягає значень 7,6-7,8 (рис. 3.9), що свідчить про швидкий розвиток гідролітичної стадії анаеробного

збродження з розщепленням органічних сполук до більш простих, та вихід діоксиду карбону й водню. Згодом, значення рН стабілізуються в діапазоні (7,0-7,3), що є оптимальним для розвитку метаногенної асоціації мікроорганізмів. Мінералізованість субстрату також змінюється, починаючи зі значень 201-205 ppm і поступово зростає до рівня 550-560 ppm, що свідчить про глибокий рівень мінералізації в анаеробних умовах.

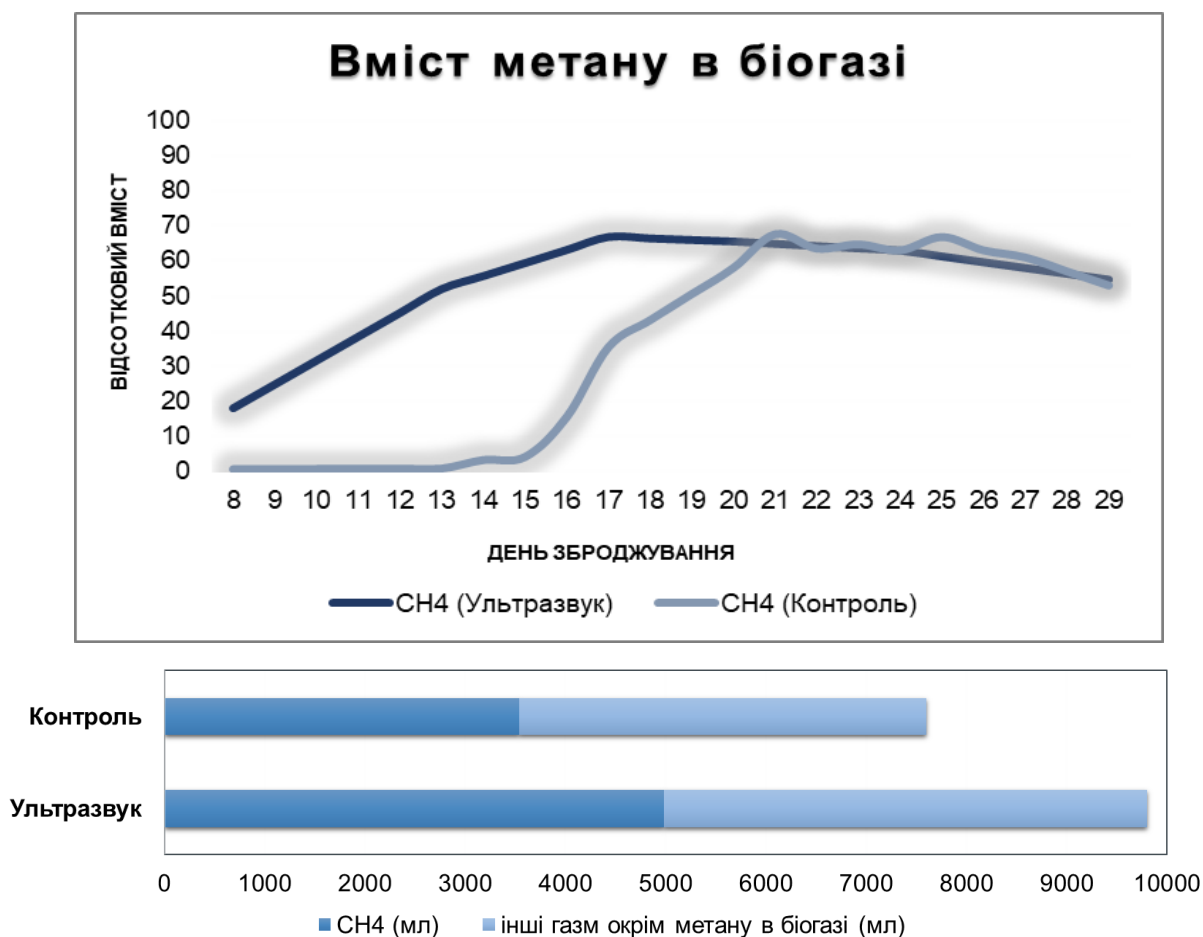


Рисунок 3.10 – Порівняння об'ємних часток копонентного складу біогазу в серії експериментів з попередньою обробкою субстрату та без обробки

Результати порівняння біосистем анаеробного збродження з попередньою обробкою субстрату УЗ та контрольною групою (без обробки) показали збільшення обсягу біогазу на 1,3 рази, що в результаті привело до виробітку 9800 мл загального обсягу та 4980 мл метану за 25 днів (див. рис. 3.10). УЗ впливає на структуру субстрату, розмір його часток та його гомогенізацію, що сприяє більш ефективному використанню субстрату анаеробними

мікроорганізмами у процесі гідролізу, ацидогенезу, ацетатогенезу та метаногенезу. УЗ прискорює вивільнення білка з органічних залишків, особливо після зменшення розміру часточок, а попередня обробка субстрату сприяє вивільненню полісахаридів в робочий об'єм.

Дослідження вказують на підвищення вихідного об'єму біогазу після УЗ обробки субстрату у межах 1,4-1,7 разів. Для нейромережевого Data Mining було використано ансамблю з 5 різних нейромереж за різними початковими налаштуваннями (3 – РБФ, 2 – багат шаровий перцептрон). Результати моделювання демонструють технологічно прийнятну якість – відносна якість репрезентації даних за всіма нейромережами становить від 78,2% до 97,5% (рис. 3.11).

Інтерфейсне вікно Data Mining моделювання ультразвукової попередньої обробки з використанням автоматизованих нейронних мереж STATISTICA

Статистичні дані про використання автоматизованих нейронних мереж STATISTICA в інтелектуальному аналізі даних для управління анаеробним збродуванням

Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Training error	Test error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
16	RBF 6-5-1	0,781890	1,000000	0,024246	0,031437	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
17	RBF 6-5-1	0,781890	1,000000	0,024246	0,031437	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
18	MLP 6-5-1	0,997408	1,000000	0,000430	0,000195	BFGS 38	SOS	Logistic	Exponential
19	MLP 6-3-1	0,998585	1,000000	0,000234	0,000070	BFGS 10	SOS	Tanh	Exponential
20	RBF 6-4-1	0,975276	1,000000	0,003047	0,051661	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

Рисунок 3.11 – Інтерфейсне вікно Data Mining моделювання ультразвукової обробки з використанням STATISTICA Automated Neural Networks

Для контролю анаеробних процесів було розроблено площини візуалізації моделювання за допомогою НМ, найкращою якістю аналізу даних виявився



багатошаровий перцептрон з одним прихованим шаром, що включає 5 нейронів, як і показано на рис. 3.12.

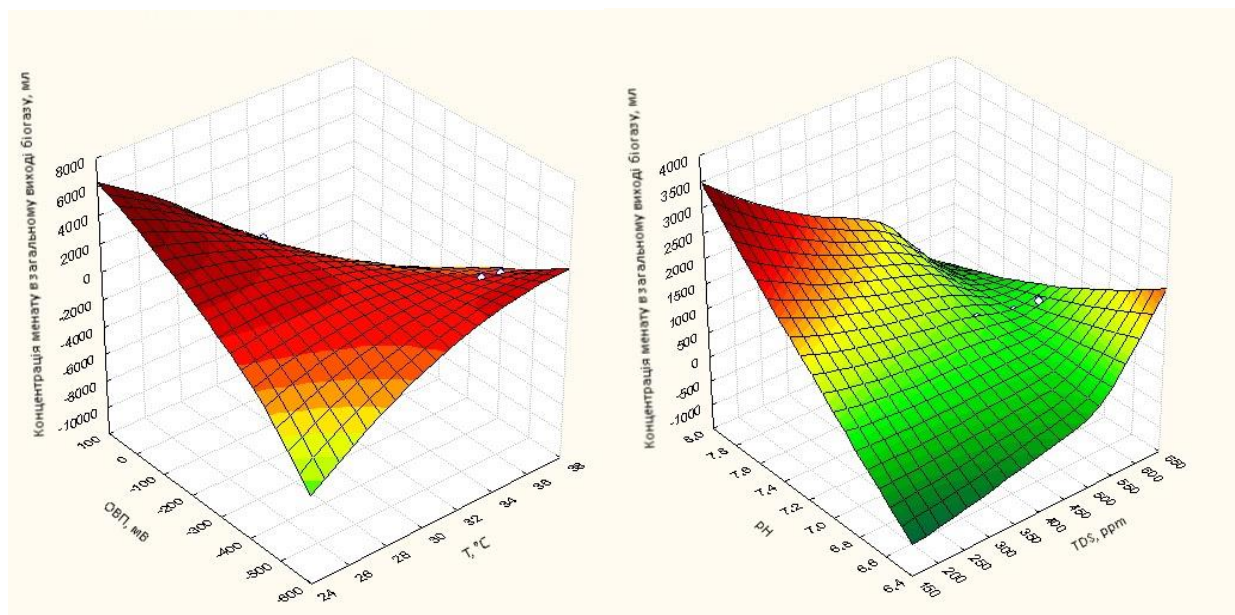


Рисунок 3.12 – Нейромоделювання інтенсифікації анаеробного зброджування за допомогою попередньої ультразвукової обробки субстрату

Отже, з допомогою отриманої нейромережевої реалізації Data Mining процесу інтенсифікації анаеробного зброджування за допомогою УЗ попередньої обробки можна зробити декілька висновків. УЗ обробка пташиного посліду та розчину ФГ має значний потенціал для покращення виробництва біогазу, тому що змінює фізико-хімічні властивості вихідного розчину для зброджування. Це досягається шляхом зміни параметрів рН, ОВП та TDS, але найбільше за рахунок зміни структури субстрату, що забезпечує більшу біодоступність субстратів та домішок, які вивільняються в рідку фазу розчину. Фактори інтенсивності УЗ кавітації обрані таким чином, щоб змінити в'язкість, швидкість дифузії розчинених газових компонентів у рідині, тиск пари, що впливає на процеси анаеробного зброджування та сприяє збільшенню виходу біогазу.

### **3.3 Комплексний біопрепарат на основі дігестату (органічного добрива) із фосфогіпсом та продукування біогазу за варіації дозування фосфогіпсу**

Для перевірки адаптивності субстратів до варіацій мінеральної добавки ФГ було використано також курячий послід та рослинні рештки. Результати виходу метану за різного вмісту добавки наведено на рис 3.13 та 3.14.

Багаторічні трави мають потенціал як енергетичні культури через високу врожайність, вміст лігніну та целюлози в біомасі, високу теплотворність, низький вміст води та низьку складність обробки полів. Крім того, вони можуть покращувати умови біорізноманіття, контролювати ерозії, підвищувати вміст органічного вуглецю в ґрунті, медіювати водні потоки та утримувати поживні речовини. Канаркова трава очеретяна є однією з таких трав і має великий енергетичний потенціал у Європі як для спалювання, так і як сировина для виробництва біопалива та біогазу. Вона має високу врожайність, низькі витрати на вирощування та здатність рости в різних умовах. Крім того, вона може використовуватись для фітореMediaції та видалення сполук азоту. Використання дігестатів в якості біодобрив може покращити внесення корисних елементів в ґрунт, а канаркова трава очеретяна може дати можливість збагачення корисними елементами ґрунту. Рослинний субстрат канаркової трави було використано для виробництва біогазу в лабораторному експерименті, з акцентом на відновлення та збагачення дігестатату за рахунок ФГ як мінеральної добавки для збагачення корисними макро- та мікроелементами, рис 3.13.

Під час порівняння різних варіантів збродження рослинного субстрату з мінеральною добавкою, виявлено, що найкращу якість та більшу кількість біогазу можна отримати при додаванні 5% ФГ до маси сухої речовини. Однак, якщо коефіцієнт мінерального навантаження ФГ збільшувати, то це призводить до зменшення виробництва біогазу, через перевагу в асоціації мікроорганізмів сульфатредукторів. Тому, для ефективного використання такої добавки для анаеробного збродження сировини забрудненої важкими металами, потрібне додаткове осадження сульфідної фракції, що утворюється в біореакторі. Такий

підхід дозволить використовувати надлишкову сульфідну фракцію для осадження важких металів що можуть міститися в дигестаті.



Рисунок 3.13 – Динаміка виходу метану з субстрату: курячий послід

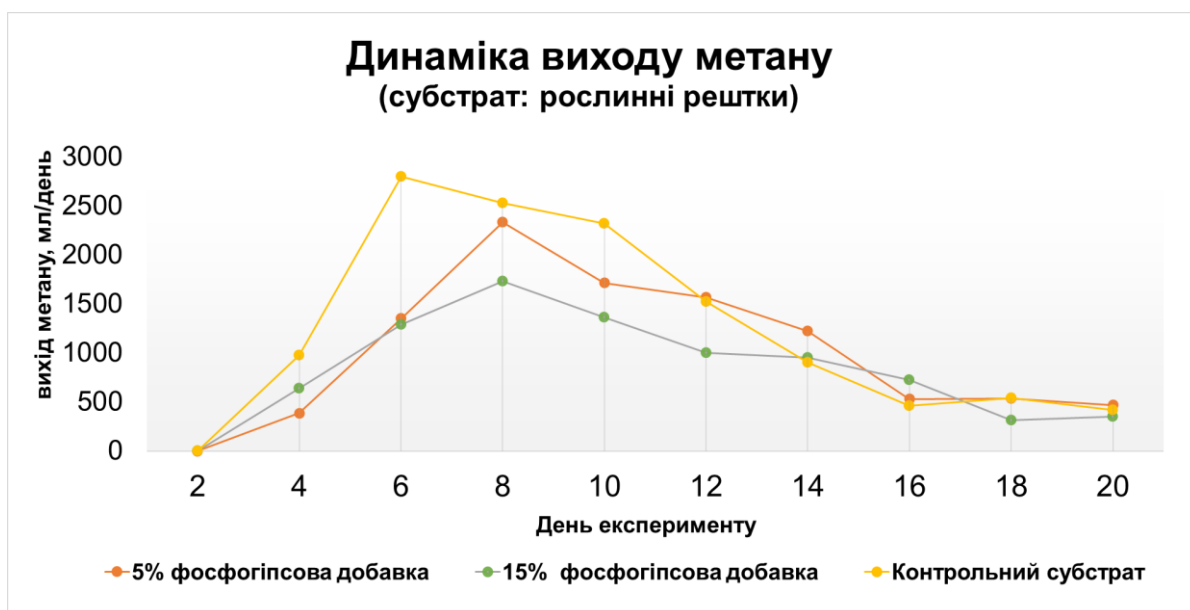


Рисунок 3.14 – Динаміка виходу метану з субстрату: рослинні рештки

Переробка пташиного посліду з отриманням біогазу та добрива потребує подальшої оптимізації. Водночас, для України курячий послід є досить перспективним органічним субстратом завдяки розвинутій галузі птахівництва. Біогаз, отриманий в результаті анаеробного зброджування пташиного посліду,

завичай містить низький вміст вуглецю та азоту і не може бути використаний у промислових масштабах, але потенціал посліду можна збільшити, комбінуючи його з іншою сировиною з високим вмістом метану, наприклад, з рослинними рештками.

Порівнюючи динаміку виходу метану варіантів збродження рослинного та пташиного субстрату з мінеральною добавкою прослідковано, що вплив ФГ добавки на метаноутворення прослідковується більше з рослинним субстратом. В цілому прослідковане незначні коливання виходу метану при збродженні пташиного посліду з фосфогіпсовою добавкою повинно з контролем. При додаванні 5% ФГ сумарний вихід метану зростає на 2,5% порівняно з контролем, при додаванні 15% зменшився на 6,5%. Вплив ФГ добавки 5% та 15% на загальний об'єм виходу метану з рослинного субстрату порівняно з контролем відображається у зменшенні загального метанового виходу на 19% та 33% відповідно.

Загальний вигляд дигестату рідкої та твердої фаз наведено на рис. 3.15.

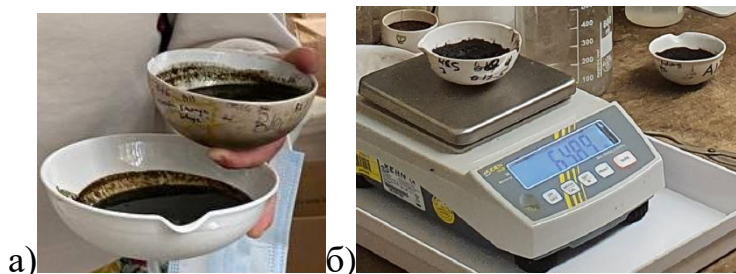


Рисунок 3.15 – Знімок вигляду дигестату, що отримано після анаеробного збродження рослинного субстрату та фосфогіпсу: а) рідка фаза; б) тверда фаза

На рис. 3.16 можна побачити, що додавання ФГ, багатого на калій, кальцій, кремній, сірку та алюміній, значно збільшує концентрації цих елементів в дигестаті. Це пояснюється тим, що високий рівень мінерального навантаження сприяє збагаченню елементами в дигестаті. Однак, у разі використання гною з високим вмістом рідкоземельних елементів, збільшення співвідношення сіно/гній може привести до зниження концентрації цих елементів у дигестаті. Отже, поточні дослідження мають на меті оптимізувати процеси відновлення елементів,

збагачення, виробництва біогазу та виявлення змін хімічних форм зв'язування цільових елементів у дигестаті.

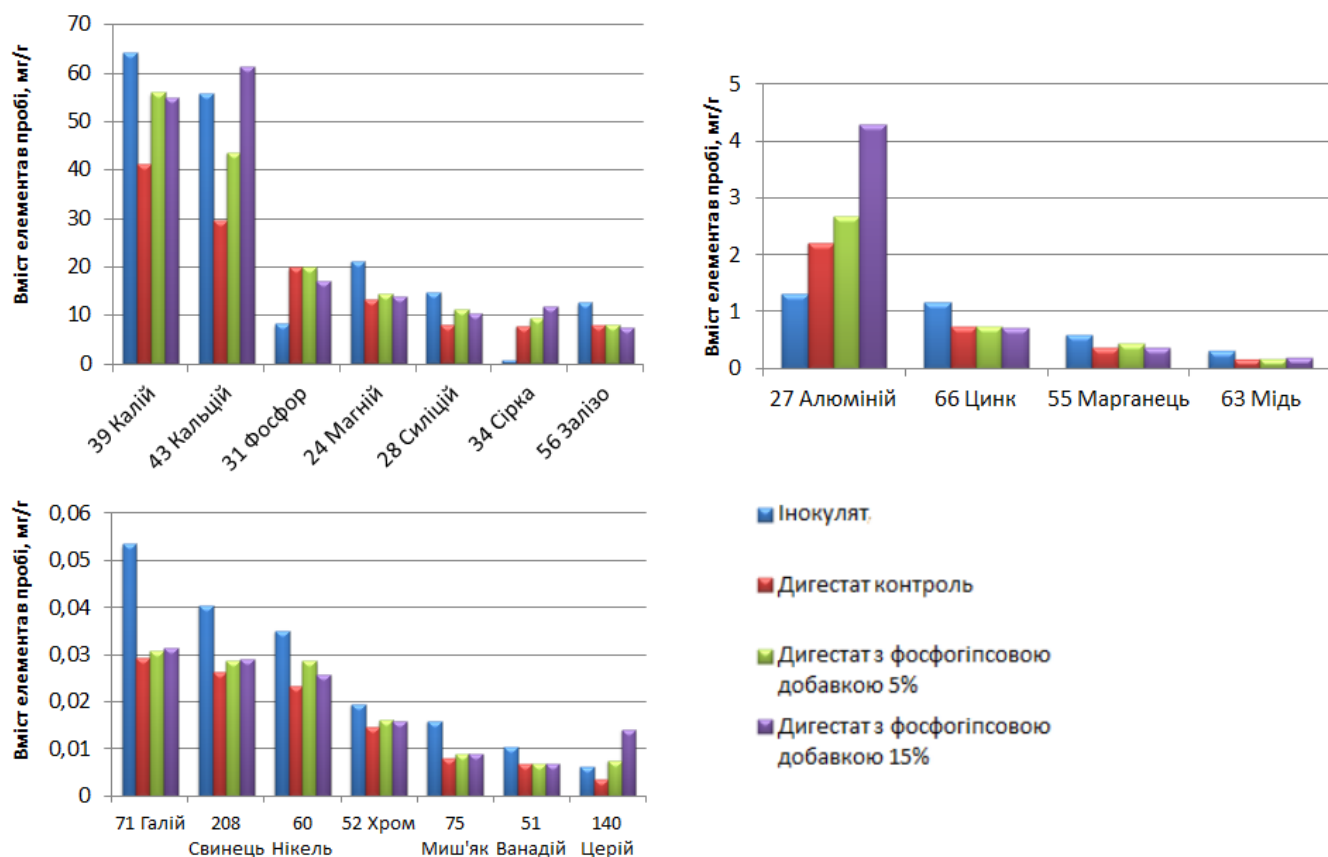


Рисунок 3.16 – Аналіз елементного складу дигестату, що отримано після анаеробного зброджування рослинного субстрату та фосфогіпсу

У зразках, які містять ФГ добавку, було помічено зменшення вмісту фосфору, відмінно від контрольних зразків. Це означає, що сполуки фосфору були виділені в рідку фракцію і можуть бути використані разом з органо-мінеральним продуктом. Результати аналізу мінеральної складової кінцевого продукту підтверджують основні положення біохімічної моделі процесу, запропонованої нами. Модель на рис. 3.17 включає механізми сорбції важких металів на органо-мінеральному біопрепараті, який базується на дигестаті, що піддається анаеробному збродженню з додаванням ФГ та електрохімічної активації кінцевого продукту перед внесенням у ґрунт. Ця модель заснована на процесах комплексоутворення, осадження, окисно-відновних процесах, катіонному обміні та електростатичному тяжінні.

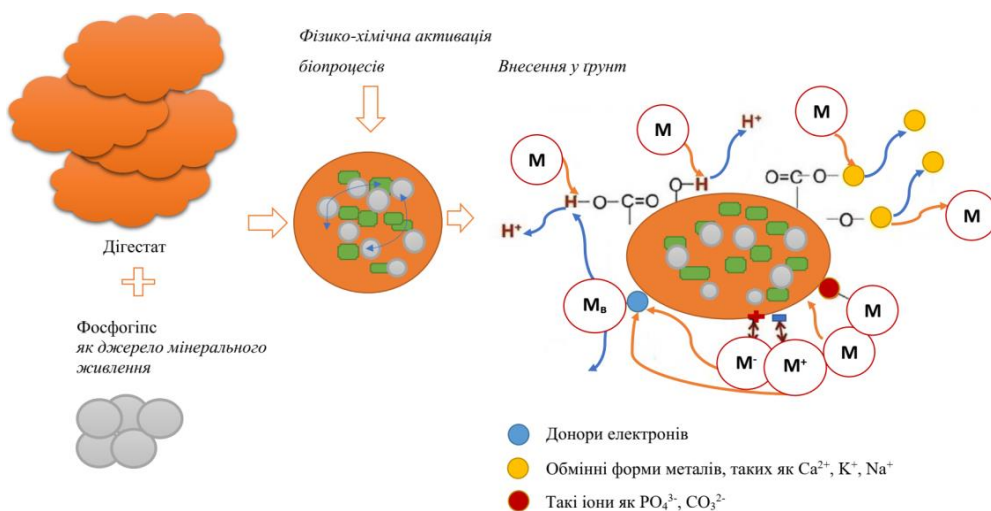


Рисунок 3.17 – Формалізація процесів адсорбції важких металів на поверхні орґано-мінерального біопрепарату, де М – умовне позначення металу, М<sub>в</sub> – відновлена форма іонів металів

Пошук ефективних місцевих бактеріальних біосорбентів є актуальним завданням, оскільки такі біосорбенти можуть виживати навіть в токсичних умовах навколишнього середовища та різних метаболічних станах. Подальші дослідження можуть розвиватися в напрямку вивчення в мікропольових умовах на забруднених важкими металами ґрунтах орґано-мінеральних біокомполітів, які утворюються після збродження різних ко-субстратів на основі орґанічних відходів.

### Висновки до розділу 3

3.1 Проведено моделювання процесу інтенсифікації анаеробного збродження орґанічних відходів разом з ФГ під час електроферментації. Вихід  $\text{CH}_4$  збільшився у порівнянні зі звичайним процесом. Крім того, під час електроферментації концентрація сірководню у процесі обробки на 14 день знизилася до 487 ppm. Візуальне мікроскопування анаеробно збродженого субстрату під впливом електролізу показало зміни в самому процесі агрегації з утворенням осередків скупчень колоній мікроорґанізмів. ОВП під час електроферментації мало флуктуючий характер, зі зниженням до -450 мВ і підвищенням до -50 мВ. Після стадії гідролізу спостерігається стабілізація значення на низьких рівнях ОВП, що відповідає стану суворого анаеробіозу та є

показником переходу до наступної стадії анаеробного зброджування. В результаті електроферментації разом з добавкою ФГ продукувалось в 4,3-4,5 рази більше метану в порівнянні з контрольними умовами та окремим експериментом лише із стимулюючою добавкою ФГ. Було розроблено формалізовану модель впливу електролізу в межах реалізації синергетичної дії електроферментації разом із добавкою ФГ на процес утилізації органічних відходів з урахуванням факторів, що впливають на стан активності метаногенної асоціації мікроорганізмів та показниками екологічної безпеки дигестату [100,101].

3.2 Досліджено вплив сумісної дії УЗ обробки та ФГ добавки на процес анаеробного збродження. УЗ обробка пташиного посліду і розчину ФГ змінює фізико-хімічні властивості вихідного розчину для зброджування. Частково це пов'язано зі зміною параметрів рН, ОВП і TDS, але більшою мірою - зі змінами структури субстрату, які забезпечують більш високу біодоступність субстратів і домішок, що виділяються в рідку фазу розчину. Окремі фактори інтенсивності УЗ кавітації призводять до зміни в'язкості, швидкості дифузії розчинених у рідині газових компонентів та тиску пари з подальшим впливом на процеси анаеробного зброджування у напрямку збільшення виходу біогазу, це все обумовлює наявність синергетичного ефекту сумісної дії УЗ обробки та ФГ добавки. Застосування УЗ попередньої обробки ФГ може розширити застосування ФГ в біопереробці органічних відходів шляхом одержання корисних екологічно-безпечних біопродуктів.

3.3 У комплексному біопрепараті на основі дигестату (органічного добрива) із фосфогіпсом порівняно з дигестатом без добавки значно збільшені концентрації калію, кальцію, кремнію, сірки та алюмінію, що дає можливість використання біопрепаратів на ґрунтах, що потребують відновлення родючості та біостимулювання розвитку корисної ґрунтової біоти.

Отримані результати дослідження впроваджені в рамках спільного українсько-чеського науково-дослідного проекту "Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів" (2021-2022 рр.) (Додаток Б) [92,99].

## РОЗДІЛ 4

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СУМІСНОЇ  
УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ НА ЗАСАДАХ ЕКОЛОГО-СИНЕРГЕТИЧНОГО  
ПІДХОДУ****4.1 Еколого-синергетичні засади інтенсифікації анаеробного  
збродження за допомогою фосфогіпсу в біоенергетичних технологіях****4.1.1 Синергетична дія фосфогіпсу як мінеральної добавки та  
електролізу в процесі електроферментації органічних відходів**

Як видно з рис. 4.1, структура інокуляту під час електроферментації змінюється, під впливом електричного струму токсичні або нерозкладні речовини окислюються до біорозкладних або повністю окиснюються до  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ . Про це свідчить підвищення виходу вуглекислого газу порівняно з контрольним експериментом. Слід відмітити явні зміни в структурі рідиннофазного середовища за розвитку еколого-трофічних груп мікроорганізмів та формування нових структур кристалічної природи, що чітко видно за збільшення 40х як у катодній, так і в анодній зонах біореактора-електролізера (рис. 4.1). Одним із найбільш значущих результатів, виявлених під час мікрокопіювання анаеробного активного мулу після впливу електролізної обробки, є зміни в самому процесі агрегування з формування осередків скупчень колоній мікроорганізмів із відгалуженнями чітко окресленої форми. Це на пряму пов'язано з реалізацією завдань дослідження, а саме з вивченням ефектів електролізного впливу в процесі анаеробного зброджування, на прикладі пташиного посліду з інокулятом активного мулу з міських очисних споруд. Відповідно визначення зміни в структурі активного мулу підтверджує якісні зміни в інокуляті як одного з ефектів у процесі обробки.



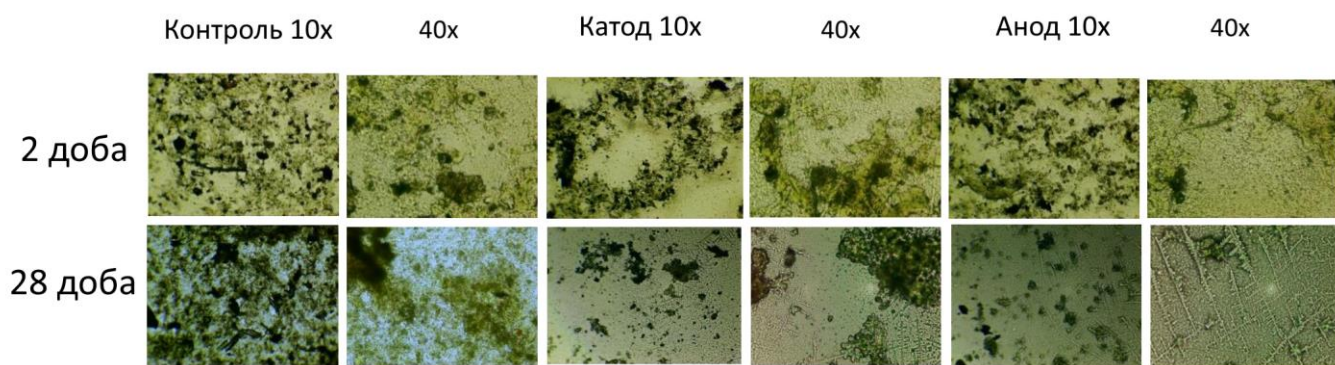


Рисунок 4.1. – Анаеробний активний мул у процесі зброджування пташиного посліду, при збільшенні, світлова мікроскопія

Найсуттєвішим результатом при порівнянні динаміки виходу біогазу в процесі електролізної обробки та без неї є визначення позитивного ефекту електролізної обробки на кількісні показники біогенного газоутворення. Зокрема, на гідролітичній стадії на 6 добу 8,3 % у біореакторі-електролізирі була частка метану в біогазі, а на 8 добу вона зросла до 15,3 %, при цьому за стандартних умов на 8 добу % метану в біогазі не перевищувала 0,6 % (див. Розділ 3).

Таким чином у процесі реалізації індукування екзогенного водню за допомогою електролізної обробки в біологічні процеси для виробництва біогазу було отримано новіші еммерджентні властивості системи за посилення метаногенезу та зменшення виходу сірководню, що є продуктом метаболізму сульфатредукторів, які використовують як акцептор електрона сульфатну фракцію ФГ. Варто зазначити, що комерціалізація біологічного процесу залежить від удосконалення конструкції біореакторів поряд із розумінням природи еколого-трофічних зв'язків в асоціаціях мікроорганізмів, що продукують водень і метан, та оптимізації процесу виробництва біогазу. Беручи до уваги складність субстрату, що біодиградується, попереднє оброблення сильним окисненням видається перспективним для поліпшення виробництва біогазу та стимулювання росту мікроорганізмів на териманльній стадії, тобто посилення метаногенезу, що було підтверджено експериментально (див. Розділ 3).

Флокули активного мулу - це багатоклітинні системи, об'єднані в агрегатні утворення завдяки зв'язуванню полімерного гелю біологічного походження,

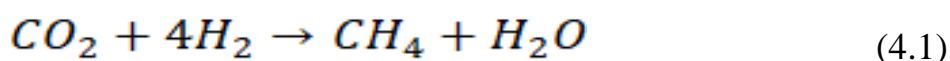
виробленого бактеріями-продуцентами біофлокуляції, що потенційно становить від 90 % до 95 % загальної біомаси. Решту біомаси займають переважно найпростіші та багатоклітинні мікроорганізми вищого рівня. Ці бактерії живляться флокулогенними бактеріями, тим самим стимулюючи їх фізіологічну активність, що також впливає на очисні властивості штучного біоценозу. Важливим аспектом в активації розвитку анаеробного активного мулу є співвідношення субстратів та інокуляту.

У наших дослідженнях важливо протестувати та оптимізувати режим роботи з використанням комбінації анаеробного біореактора з електролізною коміркою, тому ми дотримувалися одного варіанту поєднання субстрату (пташиного посліду) з інокулятом. Подальші дослідження будуть продовжені з метою вивчення впливу співвідношення субстрату та посівного матеріалу.

Структура анаеробного мулу змінюється порівняно з початково активним мулом, під впливом електричного струму токсичні або нерозкладні речовини окислюються до біологічно розкладних або повністю окислюються до  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ .

Так, при мікроскопії анаеробного активного мулу після впливу електролізу спостерігається зміна процесу агрегації з утворенням скупчень колоній мікробних клітин з чітко окресленими відгалуженнями. Цей результат пов'язаний з метою дослідження - вивчити вплив електролізу на анаеробне зброджування на прикладі пташиного посліду з закваскою активного мулу міських очисних споруд. Визначення змін у структурі активного мулу підтверджує якісні зміни в заквасці як один з ефектів процесу очищення.

Отже, електричний розряд, впливаючи на ріст метаноутворюючих бактерій, дає можливість отримати енергію за рахунок реакції відновлення  $\text{CO}_2$  до метану:



Біогенний водень як донор електронів потрібен не лише для розвитку метаногенних архей, але й сульфатвідновлювальних бактерій. Відповідно,

додатковий екзогенний водень вводять шляхом електролізу, що активує ріст літотрофів та біопродукцію метану.

Водень як донор електронів суттєво потрібен не лише для розвитку метаногенних архей, але й сульфатвідновлювальних бактерій. Відповідно, шляхом електролізу вводять додатковий екзогенний водень, який активує ріст літотрофів та біопродукцію метану.

Результати мікроскопії препаратів, забарвлених за Грамом і Цілем-Нільсеном, отриманих з анаеробного реактора, показують наявність паличкоподібних (бацили) і кулястих (коки) грамнегативних мікроорганізмів, стійких до дії кислот. Зі зменшенням співвідношення C/N і з часом, коли метаногенез наближався до термінальної стадії, поверхня анаеробного осаду ставала шорсткішою, кількість стрептококів і нитчастих бактерій зменшувалася, а кількість коків і бацил зростала. Крім того, стрептококи та нитчасті бактерії були присутні переважно на поверхні частинок осаду, а всередині частинок спостерігалися рідко.

Крім процесу метанування, наведені вище дані свідчать про те, що в кінці дослідження в розчині були присутні представники родів *Methanococcus* і *Methanobacillus*. Вони є мезофілами і здатні жити в умовах кімнатної температури. Біогенний водень є дуже затребуваним у родовищі як донор електронів не тільки для розвитку метаногенних архей, але й для сульфатвідновлювальних бактерій. Відповідно, додатковий екзогенний водень вводиться шляхом електролізу, що активує ріст літотрофів, а біосистема каталізує утворення метану. Для більш глибокого вивчення цих механізмів були використані біоінформаційні бази даних, а саме KEGG та EAWAG-BBD. На рис. 4.2 представлено консорціум метаногенних мікроорганізмів на основі даних про метаболізм, різноманітність, наявність певних ферментів, основні шляхи трансформації та експериментальне підтвердження домінування гідрогенотрофних метаногенів. Повний набір ферментних систем, що беруть участь в анаеробній ферментації органічних речовин, зокрема, продуктів аквакультури, з урахуванням експериментальної ідентифікації видів мезофільних

метаногенних археобактерій, присутніх у консорціумі, було змодельовано з використанням наступних біоінформатичних баз даних: *Methanococcus maripaludis* Delta RC (10%), *Methanococcus maripaludis* LL (12%), *Methanococcus maripaludis* JCM 10013 (10%), *Methanococcus voltae* JCM 16865 (15%), *Methanococcus maripaludis* C5 (22%), *Methanobacillus omelianskii* МОН (11 %) (утилізаційний метаногенез), і незначно представлені *Methanosarcina acetivorans* C2A 9 (12 %) та *Methanosarcina mazei* JL01 (8 %) (ацетатокластичний метаногенез).

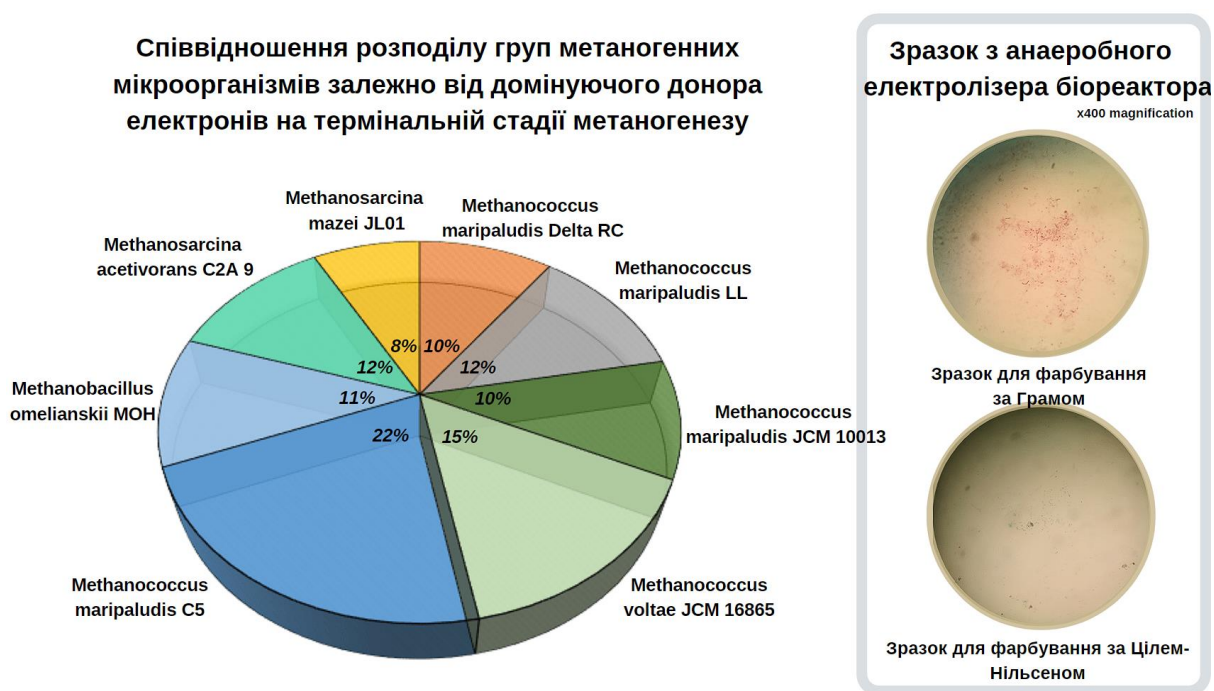


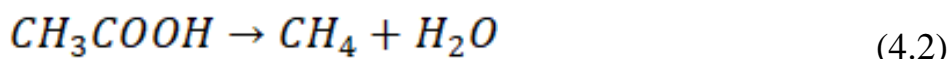
Рисунок 4.2 – Моделювання складу метаногенів під впливом електричного струму в процесі анаеробного зброджування

Таким чином, у нашому дослідженні в біореакторі-електролізері формувалося середовище з додатковим екзогенним джерелом водню, тому в консорціумі досить широко представлені *Methanobacillus* та *Methanococcus* sp.

Автотрофні метаногени беруть як акцептор електронів  $\text{CO}_2$ , а донор –  $\text{H}_2$ . При інтродукуванні екзогенного водню, тобто виробництві його не самими мікроорганізмами під час анаеробного зброджування (стадія ацидогенна та ацетатогенна), а за допомогою електролізу, стимулюється автотрофний метаногенез. Електричний розряд, впливаючи на ріст метаноутворювальних

бактерій, уможлиблює отримання енергії за рахунок реакції відновлення  $\text{CO}_2$  до метану.

Слід зазначити, що в штучних системах типу анаеробний біореактор домінує ацетаткластичний метаногенез, тому що відповідно до трофічних шляхів продукуватиметься  $\text{CO}_2$ , леткі органічні кислоти та ацетати у значній кількості метаболізуються, що дає можливість домінувати ацетаткластичному метаногенезу за реакцією, наприклад, за реакцією відновлення  $\text{CO}_2$  до метану:



Біогенний водень значно затребуваний як донор електронів не тільки для розвитку метаногенних археїв, але й сульфатовідновлювальних бактерій. Відповідно за допомогою електролізу вноситься додатковий екзогенний водень, що активує ріст літотрофів і біосистема каталізує утворення метану. Для глибшого розгляду цих механізмів звернемося до двох біоінформаційних баз даних, а саме KEGG database та EAWAG-BBD.

Спрощену схему реакцій, що каталізуються метил-коензим-М редуктазою (methyl-coenzyme-M reductase), наведено на рис. 4.3.

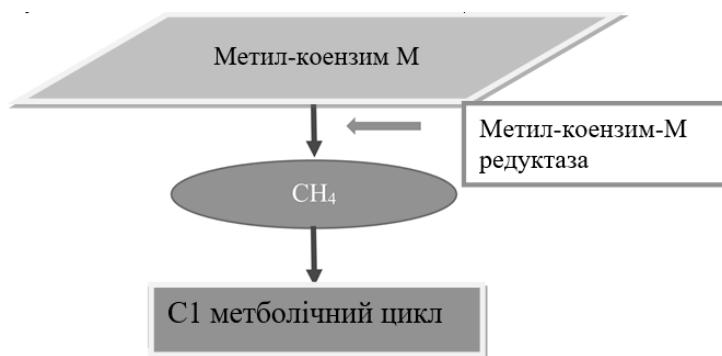


Рисунок 4.3 – Метаболічний цикл фіксації вуглецю за дії метил-коензим-М редуктази з генерацією метану метаногенними археями

Загалом повний цикл метаболізму метану має значну залежність від коензимів, які задіяні археями як природні прискорювачі біохімічних реакцій. Повний цикл метанового метаболізму представлено на рис. 4.4. Усі розшифровки до підетапів процесу можна знайти на метаболічній карті в KEGG database.

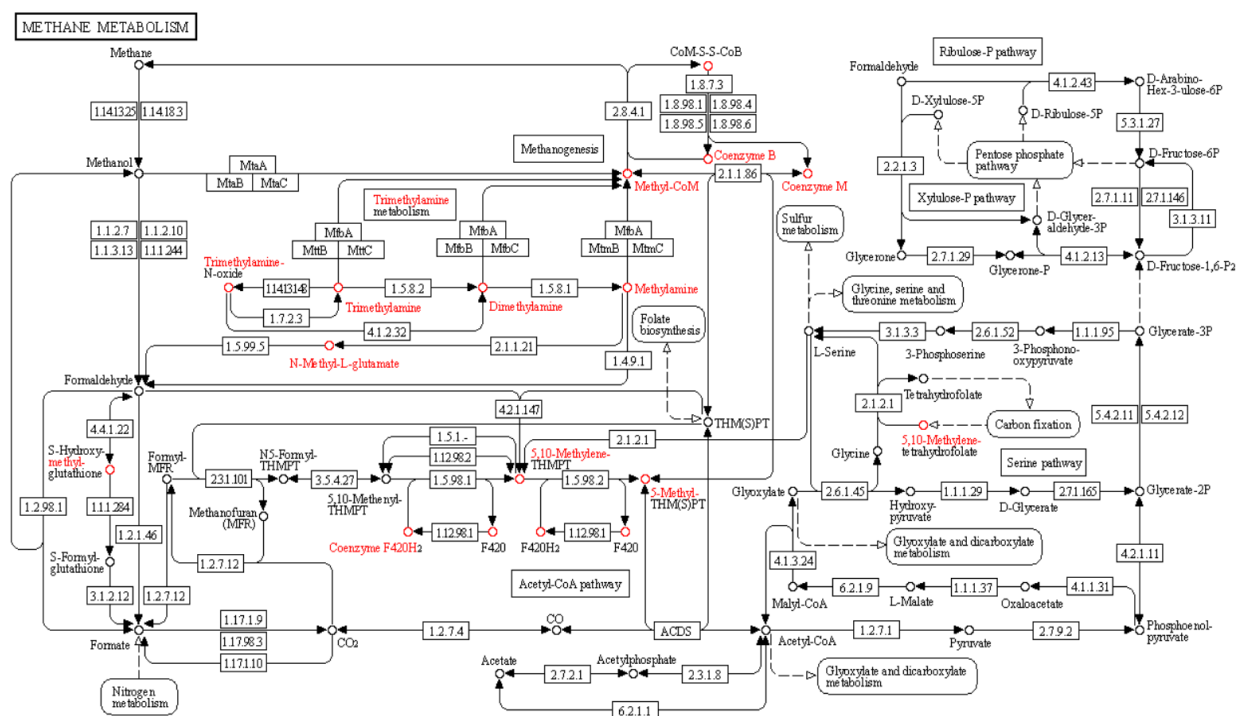


Рисунок 4.4 – Повний цикл метанового метаболізму, змодельовано з використанням KEGG database

Приклад реалізації ко-ферментних систем, які задіяні циклі метаногенними, на рис. 4.5 наведено шлях біосинтезу коензиму В у метаногенних археях.

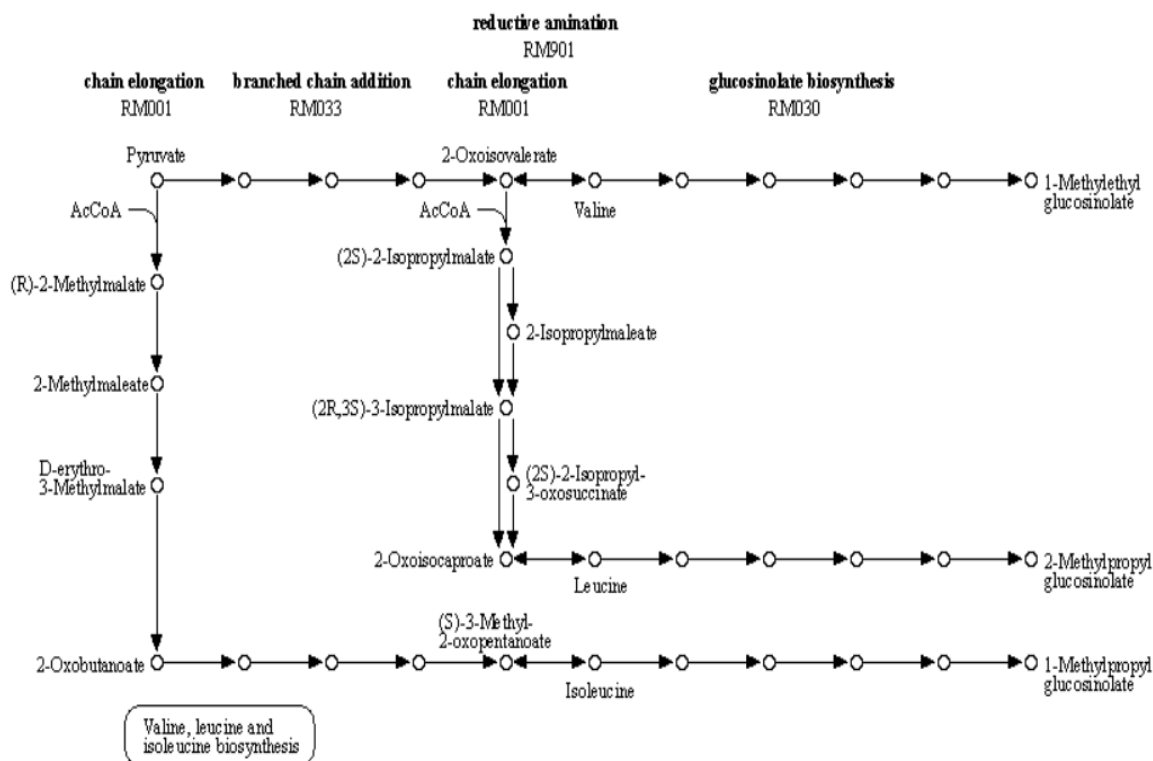


Рисунок 4.5 – Окремий випадок біосинтезу ко-ензиму в метаногенних археях, змодельовано з використанням KEGG database

Таким чином, пропонується стимулювання біометаногенезу за допомогою внесення додаткових донорів електронів - екзогенного водню. При цьому використання електролізної обробки в процесі анаеробного зброджування в комбінованому біореакторі-електролізері також сприяє лізису клітин та гідролізу складних органічних сполук, що також стимулює ферментативний процес поетапно починаючи від гідролітичної стадії до термінальної - власне одержання метану біологічним шляхом, що потребує експериментального вивчення різних режимів обробки електролізом. Окремим напрямком також можливим для вивчення є стимулювання індукуванням індукуванням екзогенного водню темної ферментації з отриманням біоводню. Такі можливості комбінації анаеробного зброджування з електролізною обробкою відходів сприятимуть раціональному використанню компонентів відходів зі зменшенням емісії парникових газів та виробництвом біопалива з біодобривом.

Отже, в процесах електроферментації з отриманням біогазу переважають гідрогенотрофні метаногени (80%) серед усіх метаногенів, а не ацетатокластичні. Це є відмінною рисою процесів електро-біохімічної активації, що відбуваються в анаеробних умовах обробки субстрату, на відміну від стандартних процесів промислового виробництва біогазу, де домінують ацетокластичні метаногени. Наприклад, *Methanosacetaseae* є одним з найпоширеніших ацетатокластичних метаногенів у більшості анаеробних метаногенних консорціумів, що становить 35-75% від загальної кількості Archaea.

Висвітлюючи основні метаболічні шляхи рекрутування електроноакцепторів за допомогою біоінформаційної бази даних MetaCyc, на рис. 4.6 показано шляхи трансформації CO<sub>2</sub>, що відбуваються вздовж ланцюга метаболічних реакцій метаногенезу, і представлено фрагменти цього ланцюга. Загалом, повний цикл метаболізму метану має значну залежність від коферментів, які залучаються археями як природні газові педалі біохімічних реакцій (рис. 4.6). У попередньому розділі дисертації на основі нейромережевого автоматизованого пошуку була розроблена модель, яка показує, що методи інтенсифікації виробництва біогазу мають синергетичний характер. Біохіміне

моделювання, що було здійснено нами також підтверджує нелінійність розвитку білосистеми та синергію взаємодій в ній. Відмічені ефекти не є простою сумою впливу електролізної обробки та ФГ, але відображають саморегуляційні властивості анаеробної біосистеми під час змін ОВП та дезінтеграції субстрату, а також впровадження додаткових донорів електронів (водню). Це призводить до перетворення локацій іонів металів та формування відмінностей від стандартної системи анаеробного збродження, що дозволяє отримувати більш високоякісні та екологічно безпечні біопродукти.

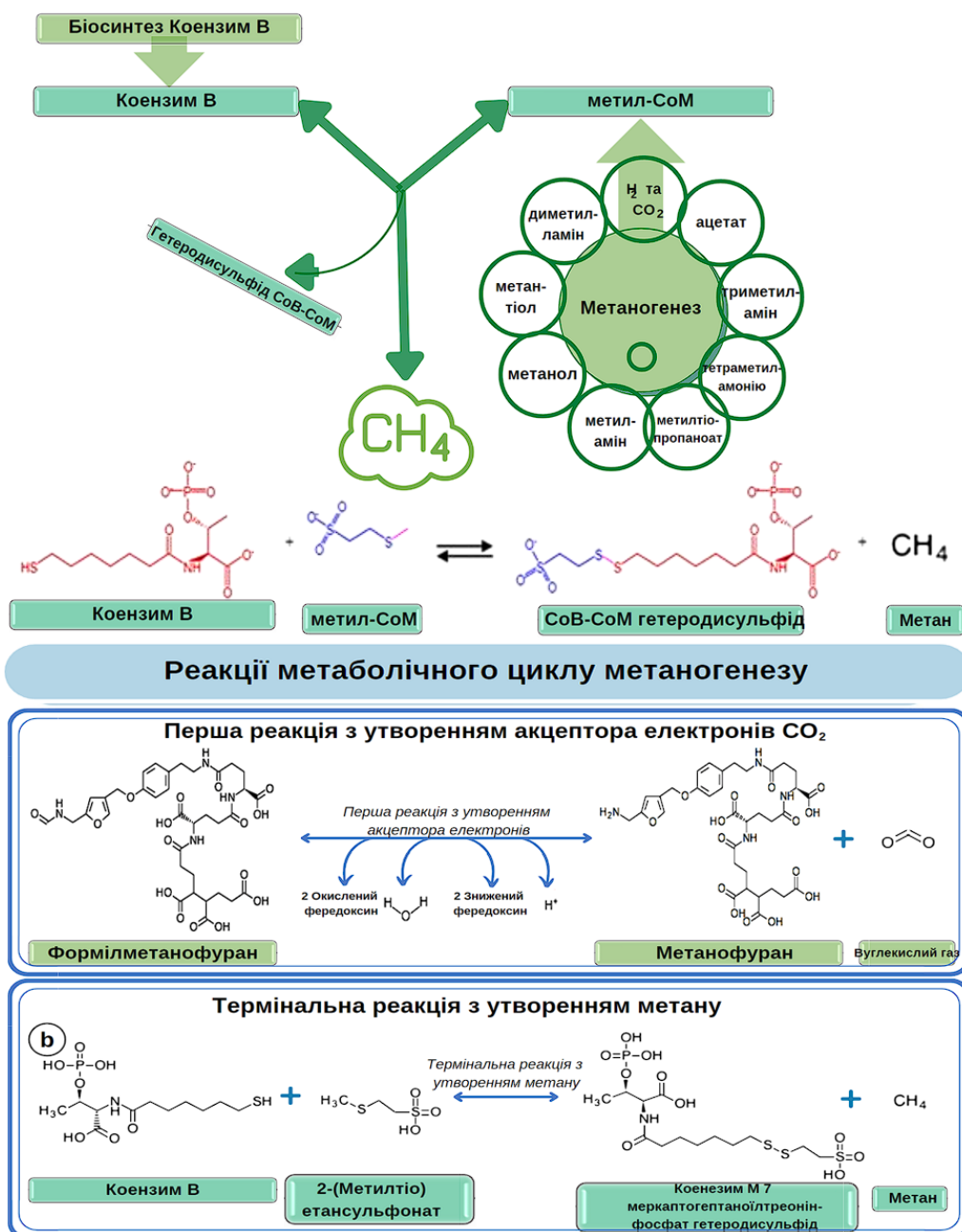


Рисунок 4.6 – Модель метаболічних шляхів метаногенезу: а) перша реакція з утворенням акцептора електронів  $\text{CO}_2$ ; б) кінцева реакція з утворенням метану



Узагальнено фактори синергетичної дії наведено на рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Фактори синергетичної дії ФГ як мінеральної добавки та електролізу в процесі анаеробного зброджування (електроферментації)

До складу модельованого консорціуму входять архейські штами на термінальній стадії метаногенезу в різних співвідношеннях, припускаючи, що група становить 100%. Різниця у значенні масового співвідношення між штамами, використаними для цієї моделі, зумовлена відмінностями в необхідних ферментах з урахуванням проміжних продуктів розпаду, які є субстратами для інших мікроорганізмів у консорціумі в еколого-трофічних зв'язках, зазначених на рисунку 4.6. Розуміння трофічних взаємовідносин мікробних консорціумів у гідрогенотрофних метаногенних змішаних культурах під час електроферментації пов'язане з урахуванням та інтерпретацією декількох змінних навколишнього середовища (температура, рН, ОВП).

На стадії гідролітичної деструкції за факультативно-анаеробних умов вихід  $\text{CO}_2$  збільшився, відбулося початкове зміщення рН у лужний бік і подальша стабілізація на 4-6 добу на нейтральному рівні, що було подібним як за стандартних умов, так і під час електролітичної обробки анаеробного зброджування. В діапазоні рН 6,0-7,5 анаеробні процеси контролюються

взаємодією системи вугільної кислоти та чистої сильної основи. З 8-ї по 10-ту добу рН стабілізується на рівні 7,5-8,0 (рис. 4.8), а TDS коливається від 455 до 535 ppm, що свідчить про підвищену мінералізацію субстрату в процесі збродження.

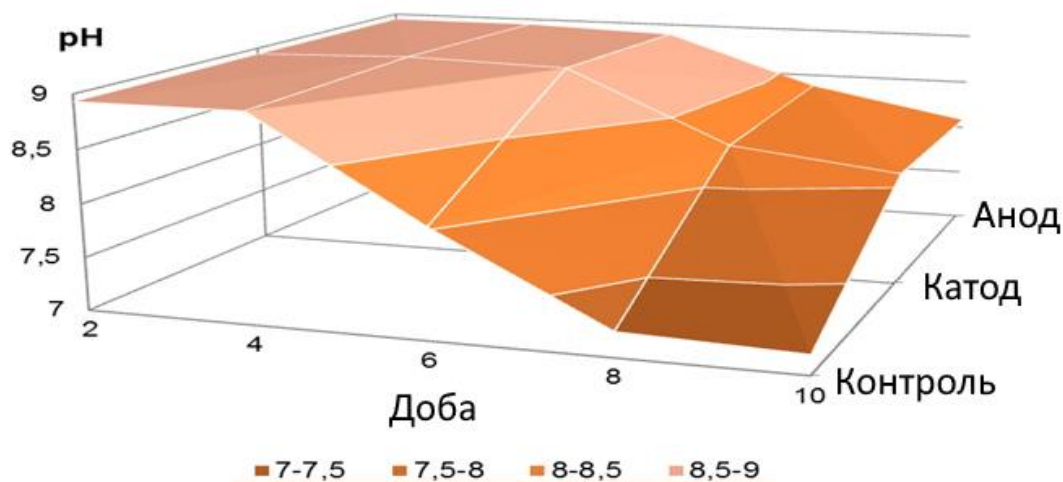


Рисунок 4.8 – Порівняння змін значень рН в експериментах з електроферментацією

ОВП в цьому випадку має флукуаційний характер зі зменшенням до -450 мВ та збільшенням до -50 мВ (рис. 4.9).

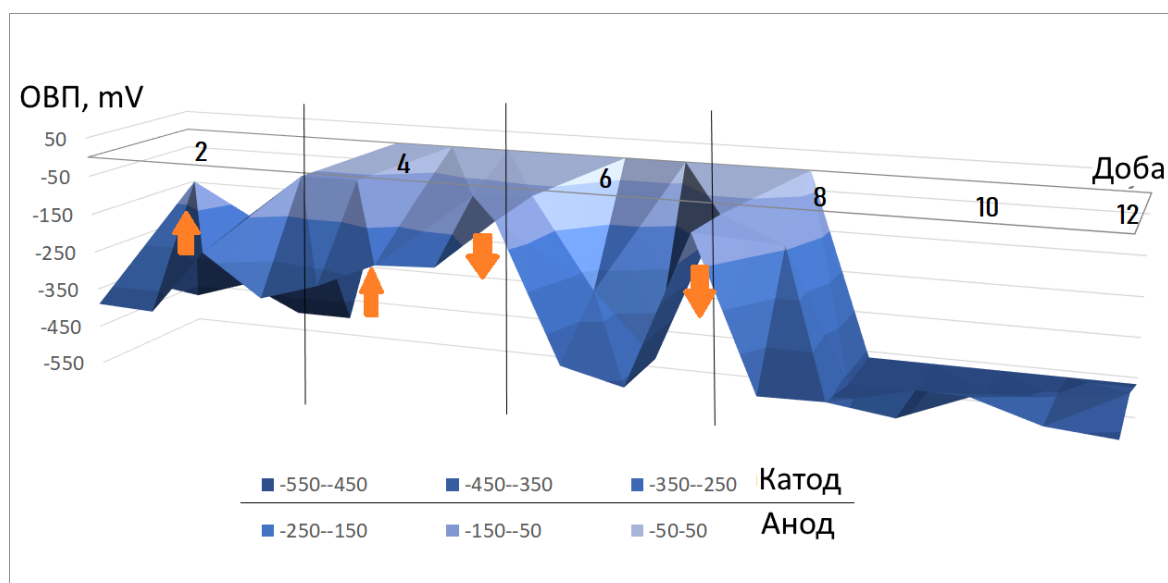


Рисунок 4.9 – Порівняння змін значень окислювально-відновного потенціалу (ОВП) в експериментах з електроферментацією

Отже ОВП використовується як параметр для контролю впорскування невеликої кількості кисню в анаеробний біореактор з метою зменшення концентрації  $H_2S$  в біогазі. Результати підтверджують (див розділ 3), що впорскування мікро-кисню може ефективно контролювати утворення  $H_2S$  без погіршення продуктивності, що є важливим під час використання добавки ФГ до органічного субстрату під час анаеробного збродження. Через 10 діб спостерігається стабілізація значення в області низьких рівнів ОВП, що відповідає стану строгого анаеробіозу і є показником переходу до наступної стадії анаеробного зброджування. Такі коливання ОВП були пов'язані з процесом дисоціації на іони при проходженні електричного струму через електроди і спостерігалися до і після включення струму в систему. Зменшення ОВП було зумовлене метаболічною активністю мікроорганізмів. У цьому дослідженні нас цікавили стадії гідролізу та ацидогенезу, тому період конверсії було взято за основу для вивчення стимулюючих ефектів впливу електролізу саме як попередника темної ферментації та/або метаногенезу. Характеристики зразків після обробки показали, що велика кількість органічного матеріалу була вивільнена із зразків осаду в рідку фазу, що вказує на потенціал для скорочення часу перебування в анаеробних метантенках і досягнення більш високих показників виробництва біогазу. Застосована обробка продемонструвала можливість видалення патогенних мікроорганізмів та отримання біологічно чистого осаду для безпечного захоронення на полігонах або застосування в сільському господарстві як добрива. Це підтверджує результати електролітичної обробки на початковій гідролітичній фазі анаеробного зброджування розчину пташиного посліду та активного мулу очисних споруд у співвідношенні 2:1. Врахування актуальних та відновлюваних характеристик водню призвело до вдосконалення різних біологічних процесів для виробництва водню. Тим не менш, комерціалізація біологічного процесу залежить від вдосконалення дизайну процесу, а також від розуміння природи спільнот, що продукують водень, та оптимізації процесу. Економічний потенціал окупності інтенсифікації процесу виробництва біогазу в процесі електроферментації наведено в Додатку Г.

Враховуючи складність субстрату, що біологічно розкладається, попередня обробка сильним окисленням видається перспективною для покращення виробництва біогазу та стимулювання росту мікроорганізмів на кінцевій стадії, тобто для посилення метаногенезу.

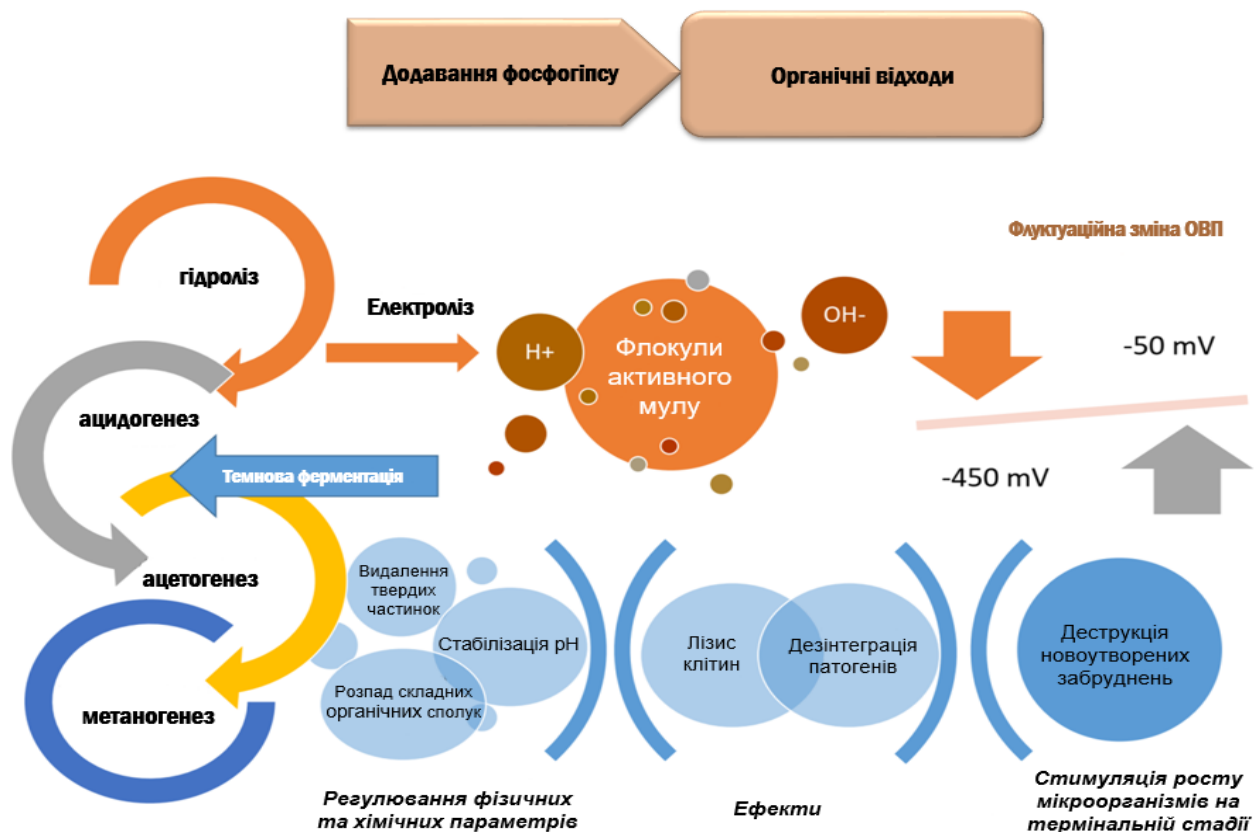


Рисунок 4.10 – Синергетична дія фосфогіпсу в процесі електроферментації

Таким чином, модель була сформована на основі біохімічного моделювання синергетичних ефектів дії ФГ разом із електроферментацією на біом плівки метаногенів, як узагальненена формалізація ефектів електролізу на різні типи субстратів і метаболічної активації мікроорганізмів під час анаеробного зброджування.

#### 4.1.2 Синергетична дія ультразвукової обробки та фосфогіпсу як мінеральної добавки в процесі анаеробного збродження

Синергетична дія УЗ та ФГ як мінеральної добавки в процесі анаеробного збродження проявляється в емерджентних властивостях анаеробної біосистеми, таких як підвищення динамічної стійкості біосистеми, що призводить до продукції екологічно безпечної композиції дигестату, а також збільшення виходу біогазу та метану у ньому. Розглянемо їх засади більш детально.

УЗ коливання є одним з механізмів, що дозволяють інтенсифікувати процеси в рідких середовищах, що досягається за допомогою надтонкого диспергування, яке збільшує міжфазну поверхню в системі "субстрат-інокулят-фосфогіпс". Інтенсифікація процесу зменшує опір перенесенню реагуючих речовин, що позитивно впливає на технологічний процес. Варто зазначити, що ФГ малорозчинний у водному середовищі. Однак, завдяки такій обробці, виходить досягти більш розчиненої компонентної фракції та зменшити процес осадження. Це знижує рівень неоднорідності і сприяє отриманню тонкодисперсних суспензій (рис. 4.11). Таким чином, стимулюється більш активне споживання ФГ мікробною клітиною на стадії ацидогенезу. Окрім того, ці процеси пов'язані зі збільшенням поверхні взаємодії і лежать в основі інтенсифікації біопроеесів.

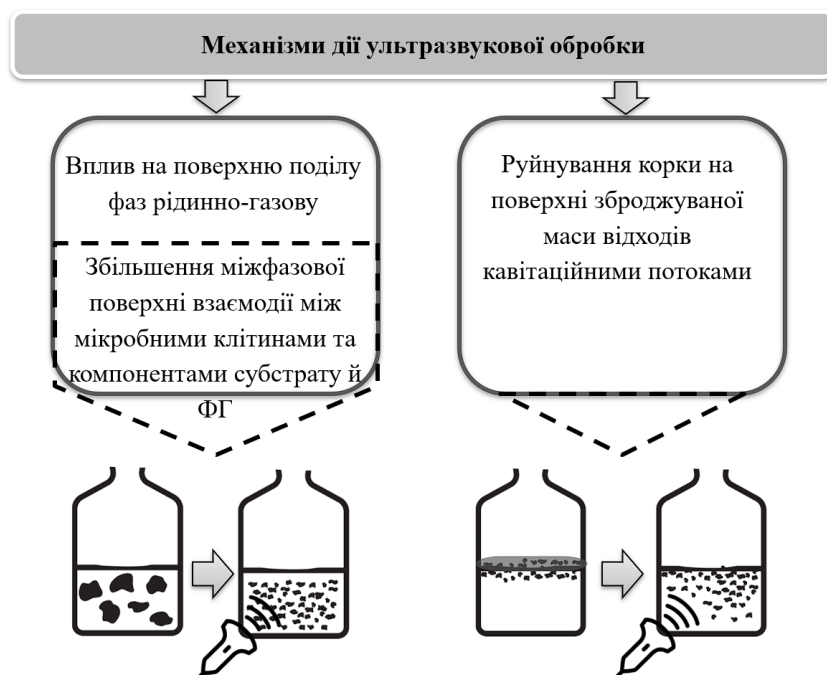


Рисунок 4.11 – УЗ впливи на процес анаеробного збродження

Введення УЗ коливань до рідинних середовищ за допомогою металевих робочих інструментів є більш ефективним, ніж у випадку газових. Це пов'язано з вищим питомим хвильовим опором рідинних середовищ, що складає близько 3500 разів більше, ніж у газів. З цієї причини, за однакової амплітуди коливань, більша потужність передається до рідини з коливальної системи установки. Але саме середовище на межі поділу рідкої-газообразної фаз формується поетапно в процесі анаеробного збродження відповідно до гідролітичного розкладання складних органічних сполук, ацидгенезу та ацетатогенезу і власне стадії метаногенезу із продуктуванням низки газових метаболітів. Відповідно це також впливає на розповсюдження коливань в біосистемі.

У рідинних середовищах спостерігається УЗ кавітація, що відповідає за виникнення і протікання специфічного фізичного процесу з максимальними енергетичними впливами на рідини та частинки твердої фракції субстрату та ФГ в рідині. Цей процес є унікальним і ефективним порівняно з аналогічними процесами у твердих тілах та газових середовищах. В результаті такого впливу стимулюється більш повне споживання макро- та мікрелементів із мінеральної добавки мікробною клітиною в межах реалізації синергетичного ефекту.



Рисунок 4.12 – Формалізація синергетичної дії на основі визначення механізмів підсилювальної дії для зброджуваних відходів

Крім того, УЗ кавітація ініціює значну кількість ефектів другого порядку, які сприяють інтенсифікації технологічних процесів. Рисунок 4.12 демонструє формалізацію синергетичної дії, яка базується на визначенні механізмів підсилювальної дії на газо-рідинну та тверду фазу зброджуваних відходів, що підвищує вихід біогазу та поліпшує біодоступність компонентів мінерального живлення через еколого-трофічні ланки анаеробної системи.

#### 4.2 Науково-практичне обґрунтування доцільності залучення фосфогіпсу в біоенергетичні технології переробки органічних відходів

У межах дисертаційного дослідження було розроблено технологічні рішення для використання та переробки вторинних ресурсів (органічних відходів та ФГ), разом з виробництвом біопалива та інших корисних біопродуктів (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Рециклінг фосфогіпсу в біоенергетичних системах

Вторинні органічні ресурси утилізуються шляхом анаеробної переробки разом з ФГ добавкою, оскільки ФГ як джерело макро- і мікроелементів для росту бактерій, створює сприятливі умови для біологічного розкладання органічних

сполук (поверхнево-активних речовин, вуглеводнів) та сприяє зв'язуванню токсичних речовин у стійкі агрегати з мікрочастинками колоїдного ФГ. В результаті сумісного зброджування утворений біогаз забезпечує виробництво «зеленої» енергії та тепла, а завантаження направляється на стабілізацію та зневоднення для подальшого використання дигістату в якості органічно-мінерального добрива на полях, в той час як виділена вода повертається в цикл водоривстування аквапонних систем. Запобігаються проблеми викидів парникових газів з органічних відходів при відсутності утилізації з заміною викопного палива на біомасу, тим самим забезпечуючи адаптації до змін клімату.

Таким чином, енерготехнологічні рішення мають переваги над стандартними методами переробки відходів: (1) оптимальне управління ресурсами та відходами, (2) закрита система з низьким вуглецевим слідом, (3) виробництво екологічно безпечного біопродукту для кінцевого споживача та (4) переробка відходів за допомогою біопроектів для виробництва біопалива. З точки зору управління ресурсами, система рециркуляційної аквакультури рециркулює 93% води, необхідної для вирощування риби, а 7% риби отримують зі свіжої води. Однак це залежить від виду риби та корму; співвідношення (у відсотках) може змінюватися між водою, обробленою для повторного використання, та свіжою водою. Управління органічними відходами, отриманими від аквакультури, є сталим, оскільки риб'ячі екскременти та будь-яка нез'їдена їжа концентруються в контейнерах і використовуються на місці для виробництва біогазу.

Було запропоновано два рішення для реалізації процесу інтенсифікації анаеробної обробки органічних відходів разом із ФГ.

Технологічна схема, представлена на рисунку 4.13 (варіант А), функціонує наступним чином:

- органічні відходи видаляються із різних джерел утворення їх (агрокомплекс, муніципальні очисні споруди тощо) за допомогою фільтруючих елементів та сепарації і вилучаються для подальшої переробки;



- відокремлений послід разом із ФГ направляється в анаеробний біореактор, в структуру якого інтегровано процес електролізу субстрату в межах електроферментації;

- під час процесу анаеробного перетворення біогаз виділяється як продукт метаногенних мікроорганізмів. Газ відводиться з реактора в газгольдер. Метан, що міститься в цій газовій суміші, є енергоносієм і може використовуватися для виробництва тепла та електроенергії;

- вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) може накопичуватися в зрідженому вигляді і використовуватися для підживлення рослин у теплицях як одне з можливих застосувань;

- рідка фаза зброджених відходів може бути направлена в рибне господарство шляхом проходження через гідропонну систему, а сухий залишок, багатий на мінеральні солі та доступні форми азоту, а може бути використано як добриво.

Схема електротехнологічної утилізації відходів, представлена на рисунку 4.13 (варіант Б), функціонує наступним чином:

- до моменту отримання органічного субстрату алгоритм дій аналогічний описаному для схеми, представленої на рисунку 4.13 (варіант А);

- після видалення посліду він направляється на УЗ обробку, де обробляється постійним електричним струмом;

- після УЗ обробки субстрат направляється в класичний анаеробний біореактор;

- подальший алгоритм з кінця періоду зброджування такий самий, як і у варіанті А.

Таким чином, варіант (А) пропонує первинне очищення шляхом проведення електроферментації екскрементів (пташиного посліду тощо) у двокамерному біореакторі з розміщенням електродів для проведення електроферментації. Отриманий дигестат не має у своєму складі токсичних компонентів і може бути використаний у гідропонних системах як добриво (рідка фаза) та у сільському господарстві (тверда фаза). Техніко-економічне обґрунтування за цим варіантом реалізації енерготехнологічного рішення обробки відходів наведено в Додатку Г.

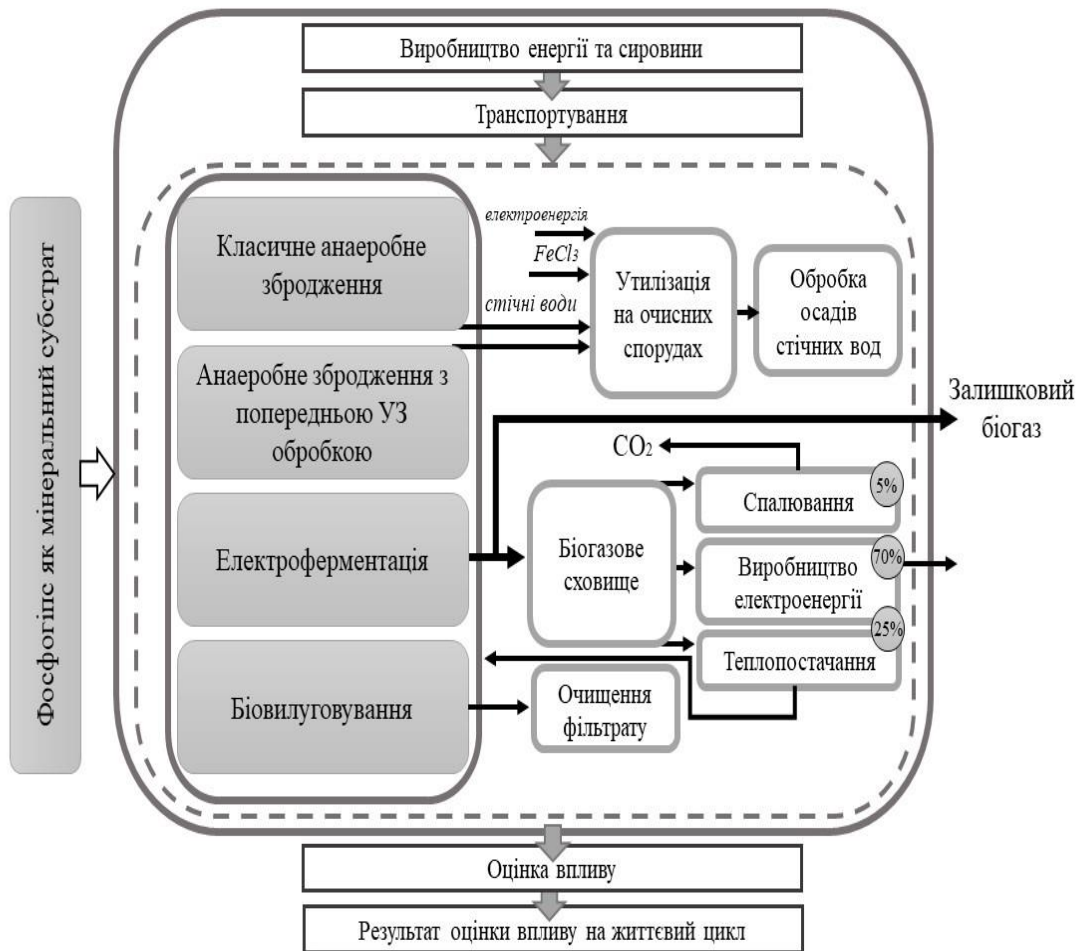


Рисунок 4.14 – Системні кордони оцінки життєвого циклу сумісної переробки органічних відходів разом с ФГ в біогазових технологіях

Під час оцінки життєвого циклу з використанням комплексної моделі впливу на навколишнє середовище було визначено три сценарії виробництва біогазу та біодобрива (класичний метаногенез без інтенсифікації, електроферментація та анаеробне збродження з попередньою обробкою УЗ кавітацією) з використанням різних комбінацій відходів (пташиний послід + ФГ; рослинні відходи + ФГ). Графічне зображення цих сценаріїв представлено на рис. 4.14. Був проведений аналіз невизначеності для підтвердження та підвищення достовірності дослідження.

Отримані результати свідчать про те, що потенційний вплив токсичності для людини, евтрофікації прісних вод та виснаження викопних ресурсів має значний внесок у загальний вплив на навколишнє середовище. Споживання

електроенергії під час анаеробного зброджування та транспортування сировини на етапі попередньої обробки також має високий потенційний вплив.

Утилізація відходів за допомогою електроферментаційних технологій, незважаючи на те, що має найменший негативний вплив на довкілля, потребує підвищених витрат енергії для проведення електролізу. Щоб зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, необхідно збільшити потужності з виробництва біогазу, підвищувати ефективність виробництва електроенергії, оптимізувати енергетичну структуру країни та зменшувати споживання електроенергії на етапі транспортування та підготовки органічних відходів. Ці шляхи є ефективними для зменшення негативного впливу на довкілля. Утилізація біогазу, прямі викиди в атмосферу, виробництво та споживання сировини, споживання та рекуперація енергії, транспортування сировини автомобільним транспортом та інфраструктура - ці процеси є спільними для всіх вищезазначених шляхів. Очищення стічних вод та фільтрату є додатковими процесами для окремих сценаріїв виробництва біогазу та біодобрива.

У результаті було отримано пілотні зразки, які будуть використані для доведення промислових зразків до необхідних споживачам з властивостями, необхідними для газоподібного палива. Практична реалізація цих результатів узгоджується з вимогами циркулярної економіки та цілями сталого розвитку до 2030 року. Агропромисловий сектор України має потенціал використання технічно доступних ресурсів органічних відходів та побічної продукції для виробництва біогазу, який складає 2,6 млрд м<sup>3</sup> СН<sub>4</sub> на рік.

Виготовлення біопалива є одним з найбільш економічних та екологічно обґрунтованих методів використання органічних відходів та побічних продуктів хімічних виробництв, таких як ФГ. Фактичний рівень енергетичної утилізації таких відходів значно нижчий, ніж те, що може бути досягнуто. Запропоноване рішення сприятиме диверсифікації наявних джерел енергії, скороченню використання викопних енергоносіїв та знешкодженню екологічно шкідливих токсичних відходів. Крім біогазу та зрошувальної води, кінцеві продукти ферментації органічних відходів (осад стічних вод, пташиний послід тощо)

можуть повторно використовуватися як штучні добрива, що додатково зменшить екологічний вплив та збільшить ступінь використання наявних ресурсів.

Запит на світові ресурси перевищує пропозицію, що призводить до зростання цін під час відновлення економік після пандемії COVID-19. Це призвело до глобальної кризи цін на життя, яка включає в себе зростання енергетичної та продовольчої бідності. Війна в Україні погіршує ситуацію, спричинюючи серйозні перебої в ланцюжку постачання добрив з усіма макроелементами. Тому наш проект дуже актуальний, оскільки нам потрібна лише підтримка для переходу від лабораторних до напівпромислових масштабів. Крім того, можливість співпраці з різними компаніями, які зацікавлені у впровадженні переробки ФГ у своє виробництво, також є важливою. Це створить ідеальну можливість для впровадження переробки ФГ у виробничу практику та створення необхідних перспектив валоризації.

Анаеробна переробка вторинних органічних ресурсів з використанням ФГ допомагає створити оптимальні умови для біологічного розкладання різних органічних сполук, таких як поверхнево-активні речовини та вуглеводні. ФГ, як джерело макро- та мікроелементів для росту бактерій, сприяє зв'язуванню токсичних речовин у стійкі агрегати з мікрочастинками колоїдного ФГ. У результаті сумісного зброджування утворюється біогаз, який може бути використаний для виробництва «зеленої» енергії та тепла. Крім того, в процесі переробки утворені продукти можуть бути використані для стабілізації та зневоднення вторинних органічних ресурсів з метою подальшого їх рециклінгу.

У даному дослідженні було розглянуто можливість використання дигестату як органо-мінерального добрива для землеробства, при цьому виділена вода повертається в аквапонну систему для подальшого використання. Така технологія не лише дозволяє уникнути проблеми з викидами парникових газів при неконтрольованій утилізації органічних відходів, але й допомагає замінити викопне паливо на біомасу, що сприяє адаптації до змін клімату.

Виробництво біопалива є одним з найбільш економічно та екологічно вигідних варіантів використання органічних відходів та побічних продуктів

хімічних виробництв, таких як ФГ. Фактичний рівень енергетичної утилізації таких відходів значно нижчий від наших можливостей. Запропоноване рішення сприятиме диверсифікації доступних джерел енергії, скороченню використання викопних енергоносіїв та знешкодженню екологічно шкідливих токсичних відходів. Крім біогазу та зрошувальної води, кінцеві продукти ферментації органічних відходів (осад стічних вод, пташиний послід тощо) можуть повторно використовуватися як штучні добрива.

Попит на світові ресурси перевищив пропозицію і спричинив зростання цін у міру відновлення економік після пандемії COVID-19. Це призвело до глобальної кризи вартості життя, що характеризується зростанням енергетичної та продовольчої бідності. Війна в Україні значно погіршує цю ситуацію, яка, серед інших негативних аспектів, спричиняє серйозні перебої в ланцюжку постачання добрив за всіма макроелементами. Таким чином, наш проект є більш ніж своєчасним, оскільки ми потребуємо лише підтримки для переходу від лабораторних до напівпромислових масштабів. Крім того, можливість співпраці з низкою компаній, зацікавлених у впровадженні переробки ФГ у своє виробництво, також знаходиться в цільовій області. Це було б ідеальною можливістю впровадити переробку ФГ у виробничу практику та створити вкрай необхідні перспективи валоризації.

Поживні речовини, що стимулюють ріст мікроорганізмів, є особливо важливими для процесів біоконверсії. Перевагами ФГ, як субстрату для різних груп мікроорганізмів та джерела макро- і мікроелементів, є: низька вартість; стимуляція розвитку необхідних еколого-трофічних груп мікроорганізмів; створення сприятливих умов для утворення біоплівки на поверхні; поверхня контакту фаз розширяється потоком газу; кислотостійкість; зв'язування токсичних компонентів; збільшення виходу біосірки. Природний механізм сорбції характерний для живих клітин бактерій (він забезпечує мікроорганізми важливими мінеральними речовинами (мікроелементами та макроелементи) у відповідних концентраціях, які надходять із мінерального субстрату ФГ).

Спосіб, що пропонується, що включає подрібнення, нагрівання, гомогенізацію, анаеробну переробку в реакторі з відбором біогазу та вивантаження перебродженої маси, анаеробну переробку органіки здійснюють послідовно в два етапи, де на першому етапі анаеробної переробки органічних речовин шляхом біохімічного розщеплення в основному відбувається гідроліз, а на другому етапі анаеробної переробки органічних речовин шляхом біохімічного розщеплення в основному відбувається метаноутворення. При цьому суміш таких органічних відходів як курячого посліду разом із мінеральною добавкою ФГ змішується на першому етапі анаеробної переробки, у дозі 5-15 % від маси органічних відходів при досягненні співвідношення С: N у суміші більше 3. Отриманий на другому етапі анаеробного збродження біопродукт вивантажується із реактора та в процесі відстоювання в окремому блоці відстійника поділяється на рідку та тверду фази, що є насиченими біогенними речовинами, корисними для розвитку рослин, і відносяться до біодобрива. Процес метанового бродіння проводиться у мезофільних умовах, тобто за температури 35-37 0С.

Отриманий після анаеробного збродження біопродукт вивантажується із реактора та в процесі відстоювання в окремому блоці відстійника поділяється на рідку та тверду фази, що є насиченими біогенними речовинами, корисними для розвитку рослин, і відносяться до біодобрива.

Концентрація метану в отриманому біогазі може варіюватися від 70% до 78%. Можливе значне підвищення виходу сірководню.

Використання ФГ, як ко-субстрату, сприятиме поліпшенню стану міських екосистем у сфері сталого використання відходів, додатково до інтенсифікації процесу виробництва біогазу.

Аналіз виробництва відходів птахівництва демонструє перспективний прогноз зростання їх обсягів утворення і високий ресурсний потенціал використання курячого посліду в біоенергетичних цілях. Водночас, важливо вивчити процеси ферментації пташиного посліду разом із мінеральною добавкою, що позитивно впливають на процес ферментації та отримання кращих, якісних і кількісних параметрів одержуваних біопродуктів (біогаз та дігестат).

Спосіб є біотехнологічним рішенням щодо використання та переробки вторинних ресурсів (органічних та хімічних відходів) з подальшим отриманням біопалива, органо-мінерального добрива та інших корисних біопродуктів. .

#### **Висновки до розділу 4**

4.1 Надано науково-практичне обґрунтування інтенсифікації процесів анаеробної трансформації в біоенергетичних технологіях із залученням мінерального ресурсу ФГ, що засноване на синергії біохімічних та фізико-хімічних процесів стимулювання розвитку окремих еколого-трофічних груп мікроорганізмів на засадах еколого-синергетичного підходу. Отримані біопродукти можуть бути використані для розвитку зеленої енергетики та агроекології в Україні.

4.2 Було розроблено метод біохімічної переробки ФГ разом з органічними відходами для виробництва біопалива. Методологія оцінки життєвого циклу дозволила врахувати всі етапи життєвого циклу від початкового виробництва до кінцевого застосування, та визначити ефективність використання ресурсів та вплив на навколишнє середовище. В результаті аналізу встановлено, що використання ФГ під час анаеробного зброджування органічних відходів є доцільним з економічної та екологічної точок зору. Використання ФГ сприяє підвищенню виходу біогазу, а також зменшенню емісії токсичних речовин та вуглекислого газу в атмосферу. Отже, використання ФГ може бути важливим елементом в оптимізації біоенергетичних технологій переробки органічних відходів [99].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було вирішено актуальне науково-практичне питання щодо покращення технологій екологічно безпечної утилізації відходів в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля, а саме відходів органічного та хімічного походження та розроблення відповідної технологічної схеми, яка забезпечить раціональне використання вторинних сировинних ресурсів та одержання продуктів для використання в енергетичних цілях та в якості біодобрива підвищеної якості.

1. Проведено аналіз техногенного впливу на екосистему відходів органічного та хімічного походження, з оцінкою впровадження різних альтернативних технологій поводження, з детальним дослідженням циклу впливу на навколишнє середовище;

2. Обґрунтовано вибір інтегрованих процесів утилізації відходів для потреб зеленої енергетики на підставі складу, властивостей і методів обробки органічних відходів з урахуванням чинників екологічної безпеки. В рамках проблеми утворення та накопичення органічних відходів що є досить серйозною в Україні, порівняно зменшення техногенного впливу, яке пов'язано з утилізацією відходів та зменшенням витрат первинних енергоносіїв, з додатковим техногенним навантаженням, що виникає в системі протягом її життєвого циклу.

3. Розроблено експериментально-методичний комплекс реалізації процесів утилізації відходів в енергетичних цілях із комбінацією методів проведення еколого-біохімічних досліджень утилізації фосфогіпсу в біоенергетичних технологіях переробки органічних відходів, на перетині між блоками досліджень за окремими технологічними рішеннями. Визначено основні чинники, що впливають на ефективність процесів утилізації фосфогіпсу та біопродуктів на його основі та оптимальні рівні параметрів функціонування запропонованих біохімічних систем утилізації фосфогіпсу.

4. Проведено моделювання процесу інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом з фосфогіпсом під час електроферментації. Структура



анаеробного мулу змінюється порівняно з спочатку активним мулом; під впливом електричного струму токсичні або нерозкладні речовини окислюються до біорозкладаються. Вихід  $\text{CH}_4$  збільшився у порівнянні зі звичайним процесом. Крім того, під час електроферментації концентрація сірководню у процесі обробки на 14 день знизилася до 487 ppm. Візуальне мікроскопування анаеробного активного мулу під впливом електролізу показало зміни в самому процесі агрегації з утворенням осередків скупчень колоній мікроорганізмів з гілками окресленої форми. ОВП під час електроферментації мало флюктуючий характер, зі зниженням до -450 мВ і підвищенням до -50 мВ. Після стадії гідролізу спостерігається стабілізація значення на низьких рівнях ОВП, що відповідає стану суворого анаеробіозу та є показником переходу до наступної стадії анаеробного зброджування. В результаті електроферментації разом з добавкою фосфогіпсу продукувалось в 4,3-4,5 рази більше метану в порівнянні з контрольними умовами та окремим експериментом лише із стимулюючою добавкою фосфогіпсу. Було розроблено формалізовану модель впливу електролізу в межах реалізації синергетичної дії електроферментації разом із добавкою фосфогіпсу на процес утилізації органічних відходів з урахуванням факторів, що впливають на стан активності метаногенної асоціації мікроорганізмів та показниками екологічної безпеки дігестату.

5 Досліджено вплив сумісної дії ультразвукової обробки та фосфогіпсової добавки на процес анаеробного збродження. Дане дослідження показує, що ультразвукова обробка пташиного розслідування і розчину фосфогіпсу має переконливі аргументи на користь підвищення виробництва біогазу, оскільки вона змінює фізико-хімічні властивості вихідного розчину для зброджування. Частково це пов'язано зі зміною параметрів рН, ОВП і TDS, але більшою мірою - зі змінами структури субстрату, які забезпечують більш високу біодоступність субстратів і домішок, що виділяються в рідку фазу розчину. Окремі фактори інтенсивності ультразвукової кавітації призводять до зміни в'язкості, швидкості дифузії розчинених у рідині газових компонентів та тиску пари з подальшим впливом на процеси анаеробного зброджування у напрямку збільшення виходу

біогазу, це все обумовлює наявність синергетичного ефекту сумісної дії ультразвукової обробки та фосфогіпсової добавки. Застосування ультразвукової попередньої обробки фосфогіпсу може розширити застосування фосфогіпсу в біопереробці органічних відходів шляхом одержання корисних екологічно-безпечних біопродуктів.

6. Запропонована зведена модель біохімічних шляхів метаногенезу під час процесів інтенсифікації анаеробного збродження на основі моделювання консорціуму, що включає архейські штами на термінальній стадії метаногенезу. Розуміння еколого-трофічних взаємовідносин мікробних консорціумів у гідрогенотрофних метаногенних змішаних культурах, пов'язане з урахуванням та інтерпретацією декількох змінних навколишнього середовища (температура, рН, ОВП) є важливим чинником розкриття мікробної екології в процесі виробництва біогазу з відходів.

7. Розроблена схема технологічного рішення захисту навколишнього середовища в замкнутому циклі генерації зеленої енергії та переробки відходів на підставі проведених експериментальних та теоретичних досліджень. Обґрунтовано, що запропоновані біотехнологічні рішення мають переваги перед стандартними методами обробки: оптимальні ресурси, замкнута система з низьким вуглецевим слідом та валоризація відходів при виробництві біоенергії.

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів наведено в додатку А, Б.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Klymchuk O. V. The strategic principle of the formation and development of the bio-fired industry in Ukraine. *Business Inform.* 2017. No. 4. P. 178–182. (In Ukrainian).
2. Kaletnik G. M., Klimchuk O. V. Ecological energy is the basis for the development of the economy of the state. *Balanced nature using.* 2013. P. 2–3, 14–17. (In Ukrainian).
3. Renewable Energy Statistics 2021. *The International Renewable Energy Agency (IRENA)*. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>.
4. Железна Т. Агробіомаса як найбільша складова енергетичного потенціалу біомаси в Україні. *UABIO - Біоенергетична асоціація України*. URL: [https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/03/ZHelyezna\\_EU4USociety\\_AgroBM\\_26-02-2021.pdf](https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/03/ZHelyezna_EU4USociety_AgroBM_26-02-2021.pdf).
5. Дорожня карта розвитку біоенергетики в Україні до 2050 року і план дій до 2025 року. *SAF Україна (Sustainable Agribusiness Forum)*. URL: <https://saf.org.ua/news/1266/>.
6. Bassam N. E. Energy plant species: Their use and impact on environment and development. London : James & James (Science Publishers) Ltd, 1998. 321 p.
7. Biofuels: Environment, technology and food security / J. C. Escobar et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2009. Vol. 13, no. 6-7. P. 1275–1287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.014>.
8. Аналіз заходів для повної відмови України від російського природного газу / Г. Гелетуґа та ін. *Теплофізика та теплоенергетика.* 2022. Т. 44, № 2. С. 29–37. URL: <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.4>.
9. Панцирева Г. В. Технологічні аспекти виробництва біогазу з органічної сировини. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства.* 2019. № 199. С. 276-290. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/20727>

10. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). BIOFUELS. 4th ed. Gülzow-Prüzen : Rostock, 2016. 60 p. URL: [http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/brosch\\_biofuels\\_web.pdf](http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/brosch_biofuels_web.pdf)
11. An energy-LCA analysis of municipal solid waste management / G. Liu et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 120. P. 131–143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.003>.
12. Impact of organic waste composition on life cycle energy production, global warming and Water use for treatment by anaerobic digestion followed by composting / S. A. Pace et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 137. P. 126–135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.030>
13. Голуб Н. Б., Шинкарчук М. В., Козловець О. А. Шляхи підвищення продукування біогазу при зброджуванні жировмісних відходів шкіряного виробництва. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 2. С. 103–107. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu\\_tekh\\_2018\\_2\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2018_2_18)
14. Shvorov S., Polischuk V., Davidenko T. Intensification of the methane fermentation process in biogas installations based on the use of melass barda. *Energy and automation*. 2019. Vol. 2019, no. 1. P. 37–44. URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2019.01.037>
15. Dychko, A.O., Yevtieieva, L.I., Opolinskiy, I.O. Intensification of process of bioenergetic transformation of biomass into biogas. *Management of Development of Complex Systems*. Kyiv, Ukraine : KNUCA. 2022. Vol. 22, no. 1. P. 193-198.
16. Intensification of production of biogas by exposure of electromagnetic field and ultrasound / N. N. ZABLODSKY et al. *Energy and automation*. 2018. Vol. 2018, no. 1. P. 13–23. URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2018.01.013>
17. Klius V., Chetveryk H., Masliukova Z. Increasing of energy effective of biogas reactors. *Vidnovluyana energetika*. 2019. No. 4(59). С. 92–99. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).92-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).92-99)
18. Joshi S. M., Gogate P. R. Intensifying the biogas production from food waste using ultrasound: Understanding into effect of operating parameters. *Ultrasonics*

*Sonochemistry*. 2019. Vol. 59. P. 104755.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104755>

19. Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation / P. N. Patil et al. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. Vol. 30. P. 79–86.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.009>

20. Ecological intensification by integrating biogas production into nutrient cycling: Modeling the case of Agroecological Symbiosis / K. Koppelmäki et al. *Agricultural Systems*. 2019. Vol. 170. P. 39–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.007>

21. A case of sustainable intensification: Stochastic farm budget optimization considering internal economic benefits of biogas production in organic agriculture / B. Blumenstein et al. *Agricultural Systems*. 2018. Vol. 159. P. 78–92.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.10.016>

22. Intensification of anaerobic digestion efficiency with use of mechanical excess sludge disintegration in the context of increased energy production in wastewater treatment plants / M. Żubrowska-Sudoł et al. *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 22.

URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200208>

23. Assessment of Excess Sludge Ultrasonic, Mechanical and Hybrid Pretreatment in Relation to the Energy Parameters / Ł. Skórkowski et al. *Water*. 2018. Vol. 10, no. 5. P. 551. URL: <https://doi.org/10.3390/w10050551>

24. Parawira W. Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2011. Vol. 32, no. 2. P. 172–186. URL: <https://doi.org/10.3109/07388551.2011.595384>

25. Improving Anaerobic Digestion of Sewage Sludge by Hydrogen Addition: Analysis of Microbial Populations and Process Performance / E. Martínez et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 7. P. 1228. URL: <https://doi.org/10.3390/en12071228>

26. Application of electromagnetic field in anaerobic biodigestion in batch reactors / J. C. d. S. Matos et al. *BioResources*. 2020. Vol. 15, no. 3. P. 4972–4981. URL: <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.4972-4981>

27. The Influence of Phosphogypsum Addition on Phosphorus Release in Biochemical Treatment of Sewage Sludge / Y. Chernysh et al. *International Journal of*

*Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, no. 6. P. 1269.  
URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph15061269>

28. Prasad R. D. Empirical Study on Factors Affecting Biogas Production. *ISRN Renewable Energy*. 2012. Vol. 2012. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.5402/2012/136959>

29. Impact of variables affecting biogas production from biomass / M. Saraswat et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 691. P. 012043. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/691/1/012043>

30. Abdel-Shafy H. I., Mansour M. S. M. Biogas production as affected by heavy metals in the anaerobic digestion of sludge. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2014. Vol. 23, no. 4. P. 409–417. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.09.009>

31. Improvement of the biogas production process / A. Karlsson et al. 2nd ed. Linköping : Linköping University, 2014. 88 p. URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:776575/FULLTEXT01.pdf>.

32. Zablodsky N., Klendiy G., Klendiy P. Influence of low-frequency electromagnetic field on biophone explosion dynamic. *Energy and automation*. 2019. Vol. 2019, no. 1. P. 27–36. URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2019.01.027>

33. Zorg Biogas GmbH | An engineering company. *ZORG*. URL: <https://zorg-biogas.com> (date of access: 01.08.2022).

34. Recent advances in green pre-treatment methods of lignocellulosic biomass for enhanced biofuel production / N. S. Ab Rasid et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 321. P. 129038. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129038>

35. Ultrasonically enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge / L. Appels et al. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2008. Vol. 1, no. 2. P. 94–104. URL: <https://doi.org/10.1080/19397030802243319>

36. Electric Field-Driven Direct Interspecies Electron Transfer for Bioelectrochemical Methane Production from Fermentable and Non-Fermentable Substrates / G.-G. Oh et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, no. 10. P. 1293. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8101293>

37. Effect of Constant Magnetic Field (CMF) with Various Values of Magnetic Induction on Effectiveness of Dairy Wastewater Treatment under Anaerobic

Conditions / M. Zieliński et al. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2014. Vol. 23. P. 255–261.

38. A new upgraded biogas production process: Coupling microbial electrolysis cell and anaerobic digestion in single-chamber, barrel-shape stainless steel reactor / T. Bo et al. *Electrochemistry Communications*. 2014. Vol. 45. P. 67–70. URL: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.05.026>

39. Capodaglio A. G. Pulse Electric Field Technology for Wastewater and Biomass Residues' Improved Valorization. *Processes*. 2021. Vol. 9, no. 5. P. 736. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9050736>

40. Microbial electrolysis cell produced biogas as sustainable electron donor for microbial chromate reduction / C. He et al. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 403. P. 126429. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126429>

41. Evaluation of the improvement of sonication pre-treatment in the anaerobic digestion of sewage sludge / M. Á. Martín et al. *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 147. P. 330–337. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.022>

42. Application of an Innovative Ultrasound Disintegrator for Sewage Sludge Conditioning Before Methane Fermentation / M. Zieliński et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2018. Vol. 19, no. 5. P. 240–247. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/89817>

43. Modelling and optimisation of the biogas yield after hybrid alkaline-ultrasonic pre-treatment in the early stages of anaerobic digestion of potato waste to shorten the processing time / B. Gunes et al. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. P. 43–53. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.013>

44. Bougrier C., Carrère H., Delgenès J. P. Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment. *Chemical Engineering Journal*. 2005. Vol. 106, no. 2. P. 163–169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.11.013>

45. Zeynali R., Khojastehpour M., Ebrahimi-Nik M. Effect of ultrasonic pre-treatment on biogas yield and specific energy in anaerobic digestion of fruit and vegetable wholesale market wastes. *Sustainable Environment Research*. 2017. Vol. 27, no. 6. P. 259–264. URL: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.07.001>

46. Begum S., Anupoju G. R., Eshtiaghi N. Anaerobic co-digestion of food waste and cardboard in different mixing ratios: Impact of ultrasound pre-treatment on soluble organic matter and biogas generation potential at varying food to inoculum ratios. *Biochemical Engineering Journal*. 2020. P. 107853. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107853>
47. Enhanced biogas production from anaerobic codigestion of solid waste by sonolysis / A. Cesaro et al. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012. Vol. 19, no. 3. P. 596–600. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.09.002>
48. Cesaro A., Belgiorno V. Sonolysis and ozonation as pretreatment for anaerobic digestion of solid organic waste. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013. Vol. 20, no. 3. P. 931–936. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.10.017>
49. The effect of ultrasonic pretreatment on biogas generation yield from organic fraction of municipal solid waste under medium solids concentration circumstance / M. Rasapoor et al. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 119. P. 444–452. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.066>
50. Increasing Biogas Production from Maize Silage by Ultrasonic Treatment / M. Závacký et al. *Chemical Engineering Transactions*. 2010. Vol. 21. P. 439–444. URL: <https://doi.org/10.3303/CET1021074>.
51. Comparison of Ultrasonic and Hydrothermal Cavitation Pretreatments of Cattle Manure Mixed with Straw Wheat on Fermentative Biogas Production / M. Zieliński et al. *Waste and Biomass Valorization*. 2017. Vol. 10, no. 4. P. 747–754. URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9977-y>
52. Influence of Ultrasonic Disintegration on Efficiency of Methane Fermentation of *Sida hermaphrodita* Silage / M. Dudek et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2018. Vol. 19, no. 5. P. 128–134. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/89820>
53. Effect of ultrasonic post-treatment on anaerobic digestion of lignocellulosic waste / M. R. Boni et al. *Waste Management & Research*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1177/0734242x20931940>



54. The biotechnological ways of blue-green algae complex processing / V. Nykyforov et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, no. 10 (83). P. 11–18. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79789>
55. Microbial electrolysis cells and microbial fuel cells for biohydrogen production: current advances and emerging challenges / A. Saravanan et al. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00973-x>
56. Multiple syntrophic interactions drive biohythane production from waste sludge in microbial electrolysis cells / Q. Liu et al. *Biotechnology for Biofuels*. 2016. Vol. 9, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0579-x>
57. Policastro G., Cesaro A., Fabbricino M. Photo-fermentative hydrogen production from cheese whey: Engineering of a mixed culture process in a semi-continuous, tubular photo-bioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.063>
58. Yousuf A., Bastidas-Oyanedel J.-R., Schmidt J. E. Effect of total solid content and pretreatment on the production of lactic acid from mixed culture dark fermentation of food waste. *Waste Management*. 2018. Vol. 77. P. 516–521. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.035>
59. On the Edge of Research and Technological Application: A Critical Review of Electromethanogenesis / R. Blasco-Gómez et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18, no. 4. P. 874. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms18040874>
60. Microbial electrolysis cells for production of methane from CO<sub>2</sub>: long-term performance and perspectives / M. C. A. A. Van Eerten-Jansen et al. *International Journal of Energy Research*. 2011. Vol. 36, no. 6. P. 809–819. URL: <https://doi.org/10.1002/er.1954>
61. Choi O., Sang B.-I. Extracellular electron transfer from cathode to microbes: application for biofuel production. *Biotechnology for Biofuels*. 2016. Vol. 9, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0426-0>
62. Microbial electrolysis cells for electromethanogenesis: Materials, configurations and operations / A. Amrut Pawar et al. *Environmental Engineering Research*. 2020. Vol. 27, no. 1. URL: <https://doi.org/10.4491/eer.2020.484>

63. Metagenomic Reconstruction of Key Anaerobic Digestion Pathways in Municipal Sludge and Industrial Wastewater Biogas-Producing Systems / M. Cai et al. *Frontiers in Microbiology*. 2016. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00778>
64. Energetic-environmental-economic assessment of the biogas system with three utilization pathways: Combined heat and power, biomethane and fuel cell / B. Wu et al. *Bioresour. Technology*. 2016. Vol. 214. P. 722–728. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.026>
65. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage / I. Ullah Khan et al. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 150. P. 277–294. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>
66. Support for biogas in the EU electricity sector – A comparative analysis / M. Banja et al. *Biomass and Bioenergy*. 2019. Vol. 128. P. 105313. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105313>
67. Achinas S., Achinas V., Euverink G. J. W. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*. 2017. Vol. 3, no. 3. P. 299–307. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.03.002>
68. Microorganisms and Enzymes Used in the Biological Pretreatment of the Substrate to Enhance Biogas Production: A Review / M. Ferdeş et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 17. P. 7205. URL: <https://doi.org/10.3390/su12177205>
69. Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge / V. Paolini et al. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2018. Vol. 53, no. 10. P. 899–906. URL: <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076>
70. Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects / Y. Chernysh et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 1575. URL: <https://doi.org/10.3390/app11041575>
71. Chernysh Y., Plyatsuk L. Environmentally Friendly Concept of Phosphogypsum Recycling on the Basis of the Biotechnological Approach. *International Business, Trade and Institutional Sustainability*. 2020. P. 167–182. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26759-9_10)

72. An efficient methodology to use hydrolysate of phosphogypsum decomposition products for CO<sub>2</sub> mineral sequestration and calcium carbonate production / W. Zhang et al. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 259. P. 120826. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120826>

73. Рентгенозахисні властивості фосфогіпсового в'язучого з рідкоземельним наповнювачем / А. Ф. Булат та ін. *Науковий вісник НГУ*. 2010. № 5. С. 48–51.

74. Белюченко І. С., Добриднев Є. П., Муравйов Є. І. Екологічні особливості фосфогіпсу та доцільність його використання у сільському господарстві. м. Краснодар (18–19 березня 2010 р.). 2010. С. 13–22.

75. Можливості рекультивації бурових шламів та солонців з використанням фосфогіпсу / Л. Н. Скіпін та ін. *Аграрний вісник Уралу*. 2013. Т. 6 (112). С. 71–73.

76. Рекультивація земель, забруднених мазутом / О. В. Калініна. *Екологічний Вісник Північного Кавказу*. 2009. Т. 5, № 3. С. 86–87.

77. Metataxonomics of Tunisian phosphogypsum based on five bioinformatics pipelines: Insights for bioremediation / H. Trifi et al. *Genomics*. 2020. Vol. 112, no. 1. P. 981–989. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2019.06.014>

78. Барахніна В. Б., Хафізова А. А., Кіреєв І. Р. Дослідження можливості використання фосфогіпсу при біоочищенні бурових стічних вод. *Башкирський хімічний журнал*. 2011. Т. 18, № 2. С. 90–92.

79. Черниш Є. Ю. Утилізація осадів стічних вод сульфідогеною асоціацією мікроорганізмів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 21.06.01 / Є. Ю. Черниш. Суми, 2014. 215 с.

80. Microbial Diversity in Sulfate-Reducing Marine Sediment Enrichment Cultures Associated with Anaerobic Biotransformation of Coastal Stockpiled Phosphogypsum (Sfax, Tunisia) / H. Zouch et al. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01583>

81. Дензанов Г. О., Петрук Г. Д. Ресурсозберігальна технологія біоковерсії природних фосфатів. *Екологічний вісник*. 2006. С. 25.

82. Біогазові проекти в Україні 2020. Інфографіка. *SAF Україна (Sustainable Agribusiness Forum)*. URL: <https://saf.org.ua/news/1042/>.

83. Біоенергетичні об'єкти: інфографіка. *UABIO - Біоенергетична асоціація України*. URL: <https://uabio.org/materials/11862/>.

84. Як сталі біогазові технології сприяють оздоровленню ґрунтів та екосистем? – 3 аргументи до Всесвітнього дня ґрунтів. *UABIO - Біоенергетична асоціація України*. URL: <https://uabio.org/news/9351/>.

85. Класифікатор відходів ДК 005-96 (Розділи Б.1 - Б.8, В.1 - В.5) : Держ. Класифікатор України від 29.02.1996 р. : станом на 1 трав. 2008 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vb089217-96#Text>.

86. Про відходи : Закон України від 05.03.1998 р. : станом на 16 жовт. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-вр#Text>.

87. The Potential of Agricultural Biogas Production in Ukraine—Impact on GHG Emissions and Energy Production / A. Waş et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 21. P. 5755. URL: <https://doi.org/10.3390/en13215755>

88. Статистичний щорічник України за 2020 рік / ред. І. Є. Вернер. Державна служба статистики України, 2021. 455 с. URL: [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2021/zb/11/Yearbook\\_2020.pdf](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Yearbook_2020.pdf).

89. Статистичний щорічник України за 2019 рік / ред. І. Є. Вернер. Державна служба статистики України, 2020. 465 с. URL: [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2021/zb/11/Yearbook\\_2019.pdf](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Yearbook_2019.pdf).

90. Потенціал органічних відходів як субстрату для анаеробного зброджування в Україні: визначення тенденцій та екологічна безпека практики / Є. Ю. Черниш та ін. *Екологічні проблеми*. 2021. Т. 6, № 3. С. 135–144.

91. Буряк Р. І. Дослідження та прогнозування кон'юнктури ринку птиці України. *Науковий вісник НУБіП України. Серія : Економіка, аграрний менеджмент, бізнес*. 2017. С. 260.

92. Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів / Л. Д. Пляцук та ін. Звіт за договором М/2 - 2021 від 08.11.2021 р. Суми : Сум. держ. ун-т. 60 с. URL: [https://sumdu.edu.ua/images/content/science/research/2021\\_Plyatsuk-min.pdf](https://sumdu.edu.ua/images/content/science/research/2021_Plyatsuk-min.pdf).

93. Муравйов Є. І., Добриднєв Є. П. Фізичні властивості фосфогіпсу та його сумішей. *Екологічний вісник Кавказу*. 2008. Т. 4, № 2. С. 18-23.

94. The Influence of Phosphogypsum Addition on Phosphorus Release in Biochemical Treatment of Sewage Sludge / Y. Chernysh et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, no. 6. P. 1269. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph15061269>

95. Автоматизація систем моніторингу та контролю параметрів метаногенезу в процесі анаеробного збродження відходів / Черниш Є. Ю. та ін. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2022» (27 жовтня 2022)*. Харків. С. 225–227.

96. VDI 4630. Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Official edition. 2016-11 : Engl. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, 2016. 132 p.

97 Pathway Search Result. KEGG: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes. URL: [https://www.kegg.jp/kegg-bin/highlight\\_pathway?scale=1.0&map=map00680&keyword=methyl%20coenzyme](https://www.kegg.jp/kegg-bin/highlight_pathway?scale=1.0&map=map00680&keyword=methyl%20coenzyme).

98. 2-Oxocarboxylic acid metabolism - Reference pathway. *Pathway Text Search*. URL: [https://www.kegg.jp/kegg-bin/search\\_pathway\\_text?map=map&keyword=methonogenic+archaea&mode=1&viewImage=true](https://www.kegg.jp/kegg-bin/search_pathway_text?map=map&keyword=methonogenic+archaea&mode=1&viewImage=true).

99. Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів / Л. Д. Пляцук та ін. Звіт за договором М/2 - 2022 від 01.08.2022 р. Суми : Сум. держ. ун-т. 61 с.

100. Effect of Electrolysis on Activated Sludge during the Hydrolysis and Acidogenesis Stages in the Anaerobic Digestion of Poultry Manure / Y. Chernysh et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 11. URL: <https://doi.org/10.3390/su14116826>.

101. Methods for Intensifying Biogas Production from Waste: A Scientometric Review of Cavitation and Electrolysis Treatments / V. Chubur et al. *Fermentation*. 2022. Vol. 8, no. 10. P. 570. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation8100570>.

## ДОДАТОК А

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

## Статті у фахових наукових виданнях з переліку МОН України

1. Данилов Д. В., Чубур В. С., Черниш Є. Ю., Яхненко О. М. (2020) Біоенергетична утилізація відходів: моделювання напрямків розвитку. Людина та довкілля. Проблеми неоекології 34: 141-152. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2020-34-14> (Особистий внесок: проведено літературний аналіз для кластерної візуалізації на основі бібліометричного підходу, підготовка матеріалів до публікації).
2. Chernysh Y, Shtepa V, Roy I, Chubur V, Skvortsova P, Ivlieva A, Danilov D (2021) The potential of organic waste as a substrate for anaerobic digestion in Ukraine: trend definitions. Environmental Problems 6(3):135–144. <https://doi.org/10.23939/ep2021.03.135> (Особистий внесок: літературний підбір для аналізу використання різних видів органічних відходів для досягнення екологічних цілей, підготовка матеріалів до публікації, переклад).
3. Chubur V, Chernysh Y, Ferchau E, Zaffar N (2022) Effect of Phosphogypsum Addition on Methane Yield in Biogas and Digestate Properties During Anaerobic Digestion. Journal of Engineering Sciences 9(1):Н11–Н18. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).h2](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).h2) (Особистий внесок: проведено експериментальні лабораторні дослідження, аналіз отриманих результатів виробництва біогазу з мінеральною добавкою).
4. Чубур В. С., Черниш, Є. Ю., Скиданенко М. С., Данилов Д. В., Білоус О. О. (2022) Переробка пташиного посліду в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях 3(13):86–92. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.13> (Особистий внесок: проведено лабораторні дослідження, аналіз впливу ультразвукової обробки субстрату на стадіях попередньої підготовки для подальшого анаеробного зброджування збільшує)

**Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричною базами даних Scopus та Web of Science**

5. Chernysh Y, Yakhnenko O, Chubur V, Roubík H (2021) Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects. Applied Sciences 11(4):1575. <https://doi.org/10.3390/app11041575> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: програмне забезпечення та формальний аналіз напрямків переробки фосфогіпсу та можливі альтернативи його використання).*

6. Chernysh Y, Roy I, Chubur V, Shulipa Y, Roubík H (2021) Co-digestion of poultry litter with cellulose-containing substrates collected in the urban ecosystem. Biomass Convers Biorefin. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01582-y> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: формальний аналіз целюлозовмісного ко-субстрату з висушеного листя після попередньої підготовки, підготовка матеріалів до публікації).*

7. Shtepa V, Balintova M, Chernysh Y, Chubur V, Demcak S, Gautier M (2021) Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks. Applied Sciences 11(16):7551. <https://doi.org/10.3390/app11167551> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: аналіз даних та технічна підтримка комплексного використання різних методів очищення стічних вод для біологічного очищення технологічних систем).*

8. Haneklaus N, Barbossa S, Basallote M D, Bertau M, Bilal E, Chajduk E, Chernysh Y, Chubur V, Cruz J, Dziarczykowski K, Fröhlich P, Grosseau P, Mazouz H, Kiegiel K, Nieto J M, Pavón S, Pessanha S, Pryzowicz A, Roubík H, Zakrzewska-Kołtuniewicz G (2022) Closing the upcoming EU gypsum gap with phosphogypsum. Resour Conserv Recycl 182:106328. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106328> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: формальний аналіз та технічна підтримка комплексного використання різних методів очищення стічних вод для біологічного очищення технологічних систем).*

9. Chernysh Y, Balintova M, Shtepa V, Chubur V, Junakova N (2022) Effect of Electrolysis on Activated Sludge during the Hydrolysis and Acidogenesis Stages in the Anaerobic Digestion of Poultry Manure. Sustainability 14:6826.

<https://doi.org/10.3390/su14116826> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: підготовка рукопису, проведення експериментів та аналіз даних дослідження впливу електролізу на активний мул в мікробній електролізній комірці, формальний аналіз та технічна підтримка)*

10. Chernysh Y, Shtepa V, Danilov D, Plyatsuk L, Chubur V (2022) Anaerobic Digestion Combined with Electrolysis of Poultry Manure and Activated Sludge Inoculum. *Problems of the Regional Energetics* 2(54):101-113. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.09> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: проведення експериментальної досліджень електролізного впливу в процесі анаеробного зброджування на прикладі пташиного посліду з інокулятом активного анаеробного зброджування, на прикладі пташиного посліду з інокулятом активного мулу з міських очисних споруд, формалізація експериментальних даних та технічна підтримка)*

11. Chubur V, Danylov D, Chernysh Y, Plyatsuk L, Shtepa V, Haneklaus N, Roubik H (2022) Methods for Intensifying Biogas Production from Waste: A Scientometric Review of Cavitation and Electrolysis Treatments. *Fermentation* 8(10):570. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100570> (Scopus; Web of Science) *(Особистий внесок: підготовка письмового оригінального рукопису та аналіз даних фізичних та хімічних методів для інтенсифікації біопроектів з метою виробництва біогазу, формальний аналіз мікробіологічних методів для інтенсифікації біопроектів і технічна підтримка)*

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

12. Chernysh Y., Bálintová M., Chubur V. Modeling of hydrogen sulfide removal under biomethane production in the concept of renewable energy potential growth of Ukraine. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 280. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005001> (date of access: 14.03.2023). *(Особистий внесок: огляд утилізації фосфогіну в технологічних системах очищення біогазу і технічна підтримка)*

13. Данилов Д. В., Чубур В. С., Черниш Є. Ю., Яхненко О. М. Біоенергетична утилізація відходів: моделювання напрямків розвитку. *Екологія,*



*охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2020* : зб. тез доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 17-18 грудня 2020 року). Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 35-37. (Особистий внесок: аналіз кластерів розвитку біоенергетики як комплексного рішення для захисту довкілля)

14. Чубур В. С. Потенціал анаеробного зброджування органічних відходів в Україні. *6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»* : збірник матеріалів (09 – 10 лютого 2021 року). Львів : Західно-Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ), ТзОВ, 2021. С. 112.

15. Чубур В. С. Вплив магнітної обробки на процеси анаеробного зброджування органічних відходів. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції* (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Суми : СумДУ, 2021. С. 174.

16. Chubur V., Balintova M., Chernysh Y., Shtepa V., Demcak S. Intensification of anaerobic conversion of wastewater and sewage sludge: trends analysis. *2nd International Scientific Conference on Ecological and Environmental Engineering* (30 June - 1 July 2021). Wrocław, Poland, 2021. P. 35-37 (Особистий внесок: аналіз методів інтенсифікації анаеробного зброджування стічних вод та осадів стічних вод)

17. Чубур В. С., Каменський М. Є., Черниш Є. Ю., Штепа В. М. Комбінації енергетичного використання аквакультур у системі замкнутого водопостачання теплових електростанцій. *Збірник наукових праць VIII Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю, м. Вінниця, (22-24 вересня 2021)*. Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 26-28. (Особистий внесок: узагальнення напрямів комбінації енергетичного використання аквакультур нв системі замкнутого водокористування ТЕС)

18. Chernysh Y., Kharytonov M., Chubur V., Yakhnenko O., Ablieieva I., Roubík H. Bioenergy processes of organic waste recycling and phphosphogypsum

utilization. *Sustainable Development Trends and Challenges under COVID-19 : Book of abstracts 2nd Multidisciplinary Conference for Young Researchers, Sumy (29–30 November 2021)*. Prague, 2021. P. 47–48.

19. Черниш Є. Ю., Пляцук Л. Д., Чубур В. С., Г. Рубік. Біоенергетичні інновації для цілей сталого розвитку. *Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», присвяченої 203-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2-3 грудня 2021 року)*. Полтава : НУПП, ПП «Астроя», 2021. С. 345-348. (Особистий внесок: пошук оптимального співвідношення різних видів осадів стічних вод)

20. Чубур В., Черниш Є., Данилов Д., Білоус О., Пляцук Л., Ярошенко О, Штепа В., Рубік Г. Експериментальне дослідження анаеробного збродження пташиного посліду з інокулятом активного мулу. *III міжнародний науковий симпозіум «Сталий розвиток – стан та перспективи» (26-29 січня 2022)*, Львів – Славське : Збірник матеріалів. Київ : Яроченко Я. В., 2022. С. 62-65. (Особистий внесок: аналіз лабораторних даних процесу анаеробного зброджування в середині анаеробного біо реактора)

21. Чубур В. С. Електроліз у біопроцесах анаеробного зброджування. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IX Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2022 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко*. Суми : СумДУ, 2022. С. 149.

22. Chubur V., Danilov D., Skvortsova P. Bioenergy aspects of sewage sludge management. *The exploratory workshop NeXT-Chem 'Innovative Cross-Sectoral Technologies' IVth Edition 19-20 May*. Bucharest, 2022. P. 36. (Особистий внесок: аналіз стимулюючих характеристик фосфатних відходів у ролі добавки для деградації органічних відходів)

23. Черниш Є. Ю., Чубур В. С., Рубік Х. Використання мінеральних добавок під час анаеробного зброджування: тренди. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне,*

11–12 травня 2022 року. Рівне : НУВГП, 2022. С. 399. (*Особистий внесок: аналіз літературних джерел прикладних аспектів анаеробного збродження осадів стічних вод*)

24. Chernysh Y., Kharytonov M., Chubur V., Shtepa V., Roubik H. Application of biochar of different genesis: applied aspects of activation. *ISB-INMA TEH' 2022 International Symposium. Agricultural and mechanical engineering* (6-8 October 2022). Bucharest, 2022. P. 22-31. (*Особистий внесок: проведення лабораторних експериментів для аналізу прикладних аспектів процесів активації біовугілля у сільськогосподарському та біоенергетичному секторі, технічна підтримка*)

25. Черниш Є. Ю., Чубур В. С., Скиданенко М. С., Соколов О. С., Данілов Д. В., Білоус О. О., Рубік Г. Автоматизація систем моніторингу та контролю параметрів метаногенезу в процесі анаеробного збродження відходів. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2022»* (27 жовтня 2022). Харків, 2022. С. 225–227. (*Особистий внесок: вивчення параметрів процесу анаеробного збродження схеми автоматизованого моніторингу, технічна підтримка*)

26. Chernysh Y. Y., Chubur V. S., Haneklaus N., Roubik H. Ecological properties of phosphogypsum and its products: biogeosystem technique for management. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 23–25 листопада 2022 року*. Суми : Сумський державний університет, 2022. С. 97-102. (*Особистий внесок: огляд сфери застосування фосфогіпсу та методів управління фосфогіпсом*)

27. Черниш Є. Ю., Чубур В. С., Рубік Г. Огляд можливостей утилізації фосфогіпсу під час анаеробного збродження органічних відходів з використанням методології аналізу життєвого циклу. *Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»* : Матеріали. Електронне видання. Дніпро : Журфонд, 2022. С. 241-242. (*Особистий внесок:*

*оцінка сценаріїв життєвого циклу сумісної переробки органічних відходів разом с фосфогіпсом в біогазових технологіях)*

28. Чубур В. С. Вплив сумісного зброджування ко-субстратів на вихід біогазу. *Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро : ДДАЕУ, 2022. С. 149-150.

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

29. Черниш Є.Ю., Пляцук Л., Чубур В.С. Сумський державний університет МОН України. Спосіб одержання біопалива та біодобрих з органічних відходів. Патент України на корисну модель № 149860. Опубл. 08.12.21. (Патент на корисну модель). *(Здобувачка брала участь у розробці способу та його тестуванні, патентному пошуку, оформленні заявки).*

30. Chernysh Y, Roy I, Chubur V, Fukui M, Koziy I. (2021) Stimulation of Anaerobic Fermentation of Wastewater and Sewage Sludge. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing; p. 319-28. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_32) (Scopus)

## ДОДАТОК Б

### Копії актів впровадження



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Перший проректор  
Сумського державного університету

Сергій ЛЕОНОВ  
« 7 » 04 2022 р.

#### АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
Чубур Вікторії Сергіївни на тему «Екологічно безпечна утилізація відходів в  
енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля»

Основні положення та результати дисертаційного дослідження Чубур Вікторії Сергіївни на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 – технології захисту навколишнього середовища впроваджені у навчальний процес та застосовуються під час викладання дисциплін «Техноекологія», «Біотехнології в промисловості» та «Інноваційні підходи до розроблення технологій захисту довкілля». Зокрема, у навчальному процесі впроваджено запропоновані Вікторією Чубур:

- методичний підхід щодо реалізації концепції “зеленої” енергетики в процесах утилізації відходів з отриманням біогазу та виробництвом електроенергії й тепла;
- технологічні процеси екологічно безпечної утилізації відходів різного генезису, зокрема фосфогіпсу, з отриманням біопалива та біокомпозитів для ремедіації довкілля;
- спосіб інтенсифікації виробництва біогазу в технологіях адаптації до змін клімату для досягнення стабільного розвитку екосистеми в умовах високого рівня техногенного навантаження.

Завідувач кафедри екології  
та природозахисних технологій  
д-р техн. наук, проф.

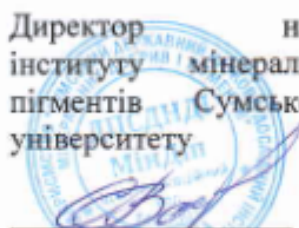
Леонід ПЛЯЦУК

Доцент кафедри екології  
та природозахисних технологій  
д-р техн. наук, доц.

Єлізавета ЧЕРНИШ

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор науково-дослідного  
інституту мінеральних добрив і  
пігментів Сумського державного  
університету



Сергій ВАКАЛ

« 15 » Вересня 2022 р.

## АКТ

про впровадження результатів спільної українсько-чеської науково-дослідної роботи "Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів" (2021-2022 рр.)

У межах спільної українсько-чеської науково-дослідної роботи (НДР) "Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів" (державний номер реєстрації: 0121U113753), були проведені тестові випробування з метою апробації технології одержання твердофазного продукту ферментації органо-мінерального добрива із анаеробного дигестату в поєднанні з фосфогіпсом як відходом хімічного виробництва, що також було здійснено в межах реалізації завдань дисертаційної роботи на тему «Екологічно безпечна утилізація відходів в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля», що виконана аспіранткою Вікторією Чубур на кафедрі екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету.

Ми, які нижче підписалися: від кафедри екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій д.т.н., проф. Л. Д. Пляцук, д.т.н., доц. Є. Ю. Черниш, аспірантка В. С. Чубур, від науково-дослідного інституту мінеральних добрив і пігментів Сумського державного університету: завідувач лабораторії А.М. Зеленський, підтверджуємо, що результати результатів спільної українсько-чеської науково-дослідної роботи передані для впровадження, а саме:

1. Результати дослідження процесу анаеробного зброджування органічних відходів з фосфогіпсовою добавкою у анаеробному реакторі з подальшим отриманням органо-мінерального добрива.

2. Інтегрована технологічна схема виробництва органо-мінерального добрива під час процесу анаеробної ферментації органічних відходів разом із

фосфогіпсом з такими характеристиками: співвідношення фосфогіпсу до маси сухого органічного субстрату 1,5:20 в анаеробному ферментері, вологість 85%, рН=6,5-7,0, мезофільний режим збродження.

3. Принципова технологічна схема виробництва орґано-мінерального добрива з дигестату, на основі збродженої орґанічної сировини вторинного походження разом з добавкою фосфогіпсу для стимулювання розвитку корисних еколого-трофічних груп мікроорґанізмів.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримано закономірності використання мінеральної складової в процесі анаеробного бродиння, що дозволяє оптимізувати вміст макро- та мікроелементів в одержаному продукті, та розрахувати технологічні параметри для досягнення оптимальних показників технічних та екологічних властивостей добрива.

2. Розроблено технологічне рішення захисту навколишнього середовища в замкнутому циклі генерації зеленої енергії та переробки відходів різного генезису (кур'ячого посліду та фосфогіпсу) на засадах еколого-синерґетичного підходу. Підтверджена повна екологічна безпека одержаного товарного продукту.

3. Результати будуть застосовані для рекомендацій утилізації фосфогіпсу в процесі сумісного анаеробного зброджування для виробництва орґано-мінерального добрива з дигестату.

Від науково-дослідного інституту мінеральних добрив і пігментів  
Сумського державного університету

Завідувач лабораторії

Анатолій Зеленський

Від Сумського державного університету

Науковий керівник НДР,  
д.т.н., професор

Леонід ПЛЯЦУК

Відповідальний виконавець НДР,  
д.т.н., доцент

Єлізавета ЧЕРНИШ

Молодший науковий співробітник,  
аспірант кафедри екології та  
природозахисних технологій

Вікторія ЧУБУР

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з наукових  
питань СП «Технополіс»

О. С. Шевченко

2022 р.

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Чубур Вікторії Сергіївни  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 183 – технології захисту навколишнього середовища

Дисертаційна робота на тему «Екологічно безпечна утилізація відходів в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля» виконана аспіранткою Вікторією Чубур на кафедрі екології та природозахисних технологій Сумського державного університету. Відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету та в межах спільного українсько-чеської науково-дослідної роботи "Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному використанні природних ресурсів" (2021-2022 рр.), були проведені тестові випробування з метою апробації технології одержання твердо фазного продукту ферментації органо-мінерального добрива із анаеробного дигестату в поєднанні з фосфогіпсом як відходом хімічного виробництва.

Ми, які нижче підписалися: від кафедри екології та природозахисних технологій Сумського державного університету аспірантка В. С. Чубур, д.т.н., доц. Є. Ю. Черниш, завідуючий кафедрою екології та природозахисних технологій д.т.н., проф. Л. Д. Пляцук, від СП «Технополіс» головний інженер проекту В. І. Овсяник підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Чубур В. С. передані для впровадження, а саме:

1. Результати дослідження процесу анаеробного зброджування органічних відходів з фосфогіпсовою добавкою у анаеробному реакторі з подальшим отриманням органо-мінерального добрива.

2. Інтегрована технологічна схема виробництва органо-мінерального добрива під час процесу анаеробної ферментації органічних відходів разом із фосфогіпсом з такими характеристиками: співвідношення фосфогіпсу до маси сухого органічного субстрату 1,5:20 в анаеробному ферментері, вологість 85%, рН=6,5-7,0, мезофільний режим збродження.



3. Принципова технологічна схема виробництва органо-мінерального добрива з дигестату, на основі збродженої органічної сировини вторинного походження разом з добавкою фосфогіпсу для стимулювання розвитку корисних еколого-трофічних груп мікроорганізмів.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримано Чубур В. С. закономірності використання мінеральної складової в процесі анаеробного бродіння, що дозволяє оптимізувати вміст макро- та мікроелементів в одержаному продукті, та розрахувати технологічні параметри для досягнення оптимальних показників технічних та екологічних властивостей добрива.

2. Розроблено технологічне рішення захисту навколишнього середовища в замкнутому циклі генерації зеленої енергії та переробки відходів різного генезису (курячого посліду та фосфогіпсу) на засадах еколого-синергетичного підходу. Підтверджена повна екологічна безпека одержаного товарного продукту.

3. Результати дисертаційної роботи Чубур В. С. будуть застосовані для рекомендацій утилізації фосфогіпсу в процесі сумісного анаеробного зброджування для виробництва органо-мінерального добрива з дигестату.

Від СП «Технополіс»

Головний інженер проекту



В. І. Овсяник

Від Сумського державного університету

Завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, д.т.н., професор

Науковий керівник, д.т.н., доцент

Відповідальний виконавець

Л. Д. Пляцук

Є. Ю. Черниш

В. С. Чубур

ДОДАТОК В  
Патент на корисну модель



## ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

**Характеристики процесу виробництва біогазу з додатковою кавітаційною попередньою обробкою**

Субстрат	Збільшення продуктивності	Умови попередньої обробки	Лімітуючі фактори	Переваги	Джерело	
1	2	3	4	5	6	
<b>Очисні споруди для стічних вод</b>	Осад стічних вод	Збільшення коефіцієнту виходу метану до <b>95%</b> .	<b>USPP:</b> потужність 150 Вт; час впливу 15, 30, 45 і 60 хв	<ul style="list-style-type: none"> <li>Економічно доцільний при певній питомій витраті енергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Збільшення коефіцієнту виходу метану збалансує енергетичні потреби; Коефіцієнт виходу метану 172 мл/г VS;</li> <li>Вища здатність до біологічного розкладання та посилена фаза гідролізу призводить до зменшення розмірів реактора та високих капітальних витрат</li> </ul>	[41]
	Осад стічних вод	Збільшення вмісту метану в біогазі до <b>68,3 ± 2,5%</b> .	<b>USPP:</b> потужність 125 Вт; напруженість поля 1,9-4,3 Вт см <sup>-2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Об'єм і склад біогазу безпосередньо залежать від потужності УЗ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ефективність установки залежить від акустичної та електронної конструкції</li> </ul>	[42]
	Стічні води з високим вмістом органічних речовин	Збільшення виходу метану до <b>60%</b>	<b>USPP:</b> потужність 400 Вт; частота 24 кГц з різним співвідношенням амплітуд; час впливу 1, 2, 3 год	<ul style="list-style-type: none"> <li>Більш високі показники видалення ХСК та БСК були в поєднанні УЗ обробки з лужною попередньою обробкою</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>УЗ попередня обробка з наступною лужною попередньою обробкою забезпечує вихід CH<sub>4</sub> на рівні 211 мл/г VS протягом перших двох днів</li> </ul>	[43]
	Активний мул з відходів	Збільшення виробництва біогазу на <b>25%</b>	<b>USPP:</b> потужність 225 Вт, частота 20 кГц	<ul style="list-style-type: none"> <li>УЗ призвів до збільшення біологічного розкладання осаду, але він не був повністю біологічно розкладений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Збільшення об'єму біогазу при подачі енергії 7000 та 15 000 кДж/кг TS;</li> <li>Межа виробництва біогазу при 7000 кДж/кг TS</li> </ul>	[44]
<b>Харчові відходи</b>	Фруктові та овочеві відходи	Збільшення виробництва метану на <b>29-80%</b> .	<b>USPP:</b> частота 20 кГц; амплітуда 80 мкм; час впливу 9 хв, 18 хв, 27 хв	<ul style="list-style-type: none"> <li>Довший час УЗ обробки не тільки збільшує енергоспоживання метантенка, але й зменшує чистий вихід енергії;</li> <li>Більш тривалий час обробки може зменшити мікробну активність</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Потужність УЗ має сильніший вплив, ніж час обробки;</li> <li>Енергетичний вихід біопроецу в порівнянні з енергетичним входом УЗ обробки в два рази вищий;</li> <li>Короткий робочий час серії означає більшу економічну рентабельність</li> </ul>	[45]
	Харчові відходи та картон	Збільшення виходу біогазу до <b>26%</b> .	<b>USPP:</b> потужність 750 кВт; частота 20 кГц; час впливу 30 хв, 45 хв, 60 хв	<ul style="list-style-type: none"> <li>Існує зворотна залежність між необхідною питомою енергією і показником TS в субстраті;</li> <li>Існує пропорційна залежність між необхідною енергією та часом попередньої обробки УЗ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Визначає, що попередня обробка УЗ буде ефективною для великих обсягів обробки субстрату</li> </ul>	[46]

1	2	3	4	5	6	
Органічна фракція твердих побутових відходів	Збільшення виробництва біогазу до <b>24%</b> .	<b>USPP:</b> густина 0,1-0,4 Вт/мл, час впливу 30 хв, 69 хв	<ul style="list-style-type: none"> <li>Умови експлуатації та потенційні витрати і вигоди</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Баланс маси та енергії: 1 кВт УЗ енергії, яка використовується для попередньої обробки осаду, генерує близько 7 кВт електричної енергії після втрат;</li> <li>Вища економія капітальних та експлуатаційних витрат може бути досягнута за рахунок зменшення розмірів метантенків</li> </ul>	[47]	
	Збільшення виробництва біогазу до <b>16%</b>	<b>USPP:</b> частота 20 кГц	<ul style="list-style-type: none"> <li>Оцінка технічної та економічної доцільності модернізації процесу потребує надійної шкали для визначення масового та енергетичного балансів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Застосування питомих значень енергії вище 15 000 кДж/кг TS не забезпечує значних ефектів солюбілізації</li> </ul>	[48]	
	Збільшення максимального виходу біогазу після 72 годин зброджування	<b>USPP:</b> частота 20 кГц; густина 0,2, 0,4, 0,6 Вт/мл; час впливу 10 хв, 20 хв, 30 хв.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Густина УЗ потужності та час впливу мали незначний вплив на зразки із загальним вмістом твердої фази 10%. Зменшився проміжок часу фази гідролізу.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Висока кількість енергії, що витрачається під час попередньої обробки ультразвуком, спричиняє значне утворення загальної кількості летких жирних кислот, що ефективно для низького вмісту TS</li> </ul>	[49]	
Сільськогосподарські відходи	Кукурудзяний силос	Збільшення виробництва біогазу та метану до <b>29,5%</b> .	<b>USPP:</b> напруженість поля 40-50 Вт-см <sup>-2</sup> ; частота 20 кГц; випромінювання припиняється через 300 год	<ul style="list-style-type: none"> <li>Споживання енергії для дезінтеграції</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Допустимо, що виробництво електроенергії зі збільшенням вмісту СН<sub>4</sub> на 30% призводить до значення балансу електроенергії приблизно 467 кДж/кг VS, можна очікувати, що виробництво електроенергії на біогазовій установці зростає приблизно на 20,7%.</li> </ul>	[50]
	Гній ВРХ в суміші з соломою пшениці (2:1)	Збільшення виробництва метану на <b>1,6-4,1%</b> та біогазу на <b>8,7-64,2%</b>	<b>USPP:</b> потужність 400 Вт; частота 24 кГц; час обробки 4,41-54,14 с	<ul style="list-style-type: none"> <li>При певних витратах енергії попередня обробка УЗ та гідротермальною кавітацією забезпечують вивільнення ХСК та підвищену солюбілізацію;</li> <li>Вирішальним фактором економічного аспекту для комерціалізації лігно-целюлозої біомаси є потреба в енергії;</li> <li>Застосування в промислових масштабах</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Найвищий показник енергоспоживання склав 4034 кДж/кг TS;</li> <li>Гідротермальне кавітаційне обладнання легше масштабувати для промислових застосувань і споживатиме менше енергії, ніж ультразвукове</li> </ul>	[51]
		Збільшення виробництва метану на <b>2,0-5,4%</b> та біогазу на <b>5,7-39,4%</b>	<b>НСPP:</b> гідрозвуковий насос 1,2 кВт; час обробки 4,41-54,14 с			
	Силос з рідким гноєм ВРХ	Збільшення виходу біогазу на <b>23,5%</b>	<b>USPP:</b> потужність 400 Вт; частота 24 кГц; час обробки 60 с, 120 с, 180 с	<ul style="list-style-type: none"> <li>Обсяги біогазу, виробленого при тривалості ультразвукової обробки 120 с і 180 с, істотно не змінилися</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Виробництво біогазу не було суттєво збільшено за рахунок збільшення часу дії ультразвукового поля</li> </ul>	[52]
Суміш органічних відходів	Збільшення виробництва метану на <b>20%</b>	<b>USPP:</b> інтенсивність 2,3, 7,7, 13,4 Вт-см <sup>-2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Умови обробки характеризуються високим енергоспоживанням, що створює складнощі для повномасштабного впровадження</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Необхідно вжити заходів для зменшення використання ультразвукової енергії з метою покращення енергетичного профілю комбінованого процесу, що відповідає загальній екологічній стійкості</li> </ul>	[53]	

1	2	3	4	5	6
Водорості	Збільшення виходу метану на <b>21.5%</b>	<b>НСРР:</b> 4000 об/хв протягом 15 хв	<ul style="list-style-type: none"> <li>Фактична ефективність метаногенезу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Теплота згоряння отриманого біогазу <math>Q = 100-5200 \text{ кДж/м}^3</math> близька до теплоти згоряння пропан-бутанової суміші</li> </ul>	[54]

- USPP – параметри попередньої обробки ультразвуком; НСРР – параметри попередньої обробки гідротермальною кавітацією; БСК – біохімічне споживання кисню; TS – загальна тверда речовина; VS – летючі тверді речовини.

## Додаток Д

**Результати техніко-економічне обґрунтування реалізації  
енерготехнологічного рішення утилізації відходів**

Таблиця Д.1

Економічне обґрунтування параметри біогазу

Параметри біогазу	
Ціна Гкал. тепла, грн	1800
Енергоємність 1 м <sup>3</sup> метана, Гкал.	0,012
Обсяг газу на 1 літр субстрату (без електролізу), м <sup>3</sup>	0,0003
Обсяг газу на 1 літр субстрату (електроліз 2 хвилини щодня), м <sup>3</sup>	0,001
Об'єм газу на 1 літр субстрату (електроліз 15 хвилин один раз), м <sup>3</sup>	0,0009
Кількість метану в біогазі, %	60
Кількість метану на літр субстрату без електролізу, м <sup>3</sup>	0,0002
Кількість метану на літр субстрату (електроліз 2 хвилини щодня), м <sup>3</sup>	0,0008
Кількість метану на літр субстрату (електроліз 15 хвилин один раз), м <sup>3</sup>	0,0005
Кількість метану на 1 м <sup>3</sup> субстрату (без електролізу)	0,18
Кількість метану на 1 м <sup>3</sup> субстрату (електроліз 2 хвилини)	0,798
Кількість метану на 1 м <sup>3</sup> субстрату (електроліз 15 хвилин)	0,51

Таблиця Д.2

Економічне обґрунтування розрахунки для метантенка

Розрахунки для метантенка	
Обсяг метантенка, м <sup>3</sup>	1500
Відсоток заповнення метантенка субстратом, %	80
Об'єм субстрату, м <sup>3</sup>	1200
Обсяг метану в метантенку після 24 днів, (без електролізу), м <sup>3</sup>	216
Обсяг метану в метантенку після 24 днів (електроліз 2 хвилини щодня), м <sup>3</sup>	957,6
Об'єм метану в метантенку після 24 днів (електроліз 15 хвилин 1 раз), м <sup>3</sup>	612
Ступінь інтенсифікації виділення газу за двохвилинного оброблення, разів	4,43

Таблиця Д.3

## Економічне обґрунтування енерговитрат

Енерговитрати	
Вартість 1 кВт*год, грн	1,44
Сила струму під час обробки (2 хвилини), А	2,5
Напруга під час обробки (2 хвилини), В	12
Споживана потужність джерела живлення (2 хвилини електролізу), кВт	0,03
Час роботи джерела живлення, годин	0,8
Енергоспоживання на 3 літри, кВт*год	0,024
Енергоспоживання на літр, кВт*год	0,008
Енергоспоживання на м <sup>3</sup> субстрату, кВт*год	8
Енергоспоживання метантенка на електроліз, кВт*год	9600
Витрати на електроенергію, грн	13824

Таблиця Д.4

## Економічне обґрунтування прибутку

Розрахунок прибутку	
Прибуток від отриманого метану (без електролізу), грн	4665,6
Прибуток від отриманого метану (електроліз 2 хвилини щодня), УАН	20684,16
Прибуток від отриманого метану (електроліз 15 хвилин 1 раз), грн	13219,2

Таблиця Д.5

## Розрахунок для енергоємного субстрату

Розрахунок для енергоємного субстрату	
Кількість метану на м <sup>3</sup> субстрату, м <sup>3</sup>	15
Кількість метану в метантенку, м <sup>3</sup>	18000
Вартість отриманого метану, грн	388800
Кількість метану після щоденної обробки субстрату електролізом	79800
Вартість отриманого після обробки метану, грн	1723680

Розрахунок для енергоємного субстрату	
Витрати на обладнання, грн	100000
Кількість циклів зброджування для компенсації вартості обладнання	0,058
Кількість днів на компенсацію вартості обладнання	1,39236
Обсяг реактора, здатного виробляти кількість газу, що дорівнює виробленій без обробки електролізом, м <sup>3</sup>	338,6
Груба вартість будівництва 1 м <sup>3</sup> метантенка, USD	500
Вартість будівництва метантенка без можливості електролізної обробки, USD	750000
Вартість будівництва метантенка з можливістю електролізної обробки, USD	169300
Час окупності будівництва метантенка без електролізної обробки, років	5
Час окупності будівництва метантенка з електролізною обробкою, років	1
Курс долара (2022 р.)	36,75

Розглянуто економічний потенціал інтенсифікації процесу виробництва біогазу та біодобрива в технологіях анаеробного збродження пташиного посліду разом з фосфігпсом в процесі електроферментації, та було встановлено, що час окупності будівництва метантенка без електролізної обробки, 5 років, а час окупності будівництва метантенка з електролізною обробкою, 1 рік.



## ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1

## Компонентний склад фосфогіпсу

Хімічний елемент	Одиниці вимірювання	Межі виявлення для нерозбавлених зразків	Зразки фосфогіпсу					
			PG 0	PG 1	PG 2	PG 3	PG 4	PG 5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
23Na-3V	µg/L	50	3,964	4,184	6,414	3,400	3,652	4,141
24Mg-3V	µg/L	1	0,074	0,046	0,044	0,059	0,038	0,038
27Al-0V	µg/L	1	0,405	0,321	0,294	0,323	0,372	0,293
28Si-3V	µg/L	100	8,281	6,895	6,904	6,411	4,990	5,157
31P-0V	µg/L	20	1,979	1,754	1,585	1,746	1,903	2,045
34S-0V	µg/L	2000	154,690	124,180	125,650	126,440	144,780	126,900
39K-3V	µg/L	200	0,039	-0,042	-0,044	-0,011	0,006	-0,009
43Ca	µg/L	20	390,700	289,100	257,500	239,100	253,300	235,600
45Sc-3V	µg/L	0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
51V-3V	µg/L	0,1	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
52Cr-3V	µg/L	0,1	0,012	0,011	0,010	0,009	0,010	0,010
55Mn-3V	µg/L	0,2	0,003	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
56Fe-3V	µg/L	1	0,330	0,509	0,387	0,241	0,476	0,256
59Co-3V	µg/L	0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60Ni-3V	µg/L	1	0,004	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002
63Cu-3V	µg/L	0,1	0,007	0,004	0,005	0,006	0,004	0,006
66Zn-3V	µg/L	1	0,020	0,018	0,014	0,016	0,018	0,017
71Ga	µg/L	0,1	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000
74Ge-3V	µg/L	0,01	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
74Ge	µg/L	0,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
75As-3V	µg/L	0,1	0,006	0,013	0,005	0,008	0,004	0,005

1	2	3	4	5	6	7	8	9
89Y	µg/L	0,01	0,197	0,142	0,153	0,100	0,142	0,149
95Mo	µg/L	0,1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
107Ag	µg/L	0,1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
111Cd-3V	µg/L	0,05	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
115In	µg/L	0,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
118Sn	µg/L	0,2	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
121Sb	µg/L	0,05	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
133Cs	µg/L	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
138Ba	µg/L	0,1	0,027	0,029	0,023	0,020	0,025	0,021
139La	µg/L	0,005	0,195	0,150	0,151	0,126	0,139	0,137
140Ce	µg/L	0,005	0,282	0,220	0,222	0,172	0,206	0,200
141Pr	µg/L	0,001	0,047	0,036	0,037	0,031	0,035	0,033
146Nd	µg/L	0,01	0,197	0,153	0,159	0,131	0,148	0,143
147Sm	µg/L	0,005	0,037	0,028	0,030	0,024	0,028	0,027
153Eu	µg/L	0,001	0,009	0,007	0,007	0,005	0,006	0,006
157Gd	µg/L	0,001	0,037	0,028	0,030	0,023	0,027	0,027
159Tb	µg/L	0,001	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004
163Dy	µg/L	0,001	0,028	0,021	0,023	0,016	0,020	0,021
165Ho	µg/L	0,001	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004
166Er	µg/L	0,001	0,030	0,023	0,024	0,017	0,022	0,023
169Tm	µg/L	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
172Yb	µg/L	0,001	0,008	0,006	0,007	0,004	0,006	0,006
175Lu	µg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
208Pb	µg/L	0,1	0,005	0,003	0,004	0,004	0,003	0,005
232Th	µg/L	0,001	0,006	0,003	0,004	0,003	0,004	0,003
238U	µg/L	0,01	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004