

УДК 620.92.002.68; 620.92.004.8
УКПП
№ держреєстрації 0122U002656
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет (СумДУ)
40017, м.Суми, вул. Римського-Корсакова, 2; тел. (0542)330172,
факс (0542)334049, E-mail: kanc@sumdu.edu.ua

ПОГОДЖЕНО
Заступник Міністра з питань
європейської інтеграції

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Сумського державного
університету

_____ Олексій ШКУРАТОВ

_____ Василь КАРПУША

«__» _____ 2022 р.

«__» _____ 2022 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
за договором М/2 -2022 від 01.08.2022 р.
«Біоенергетичні інновації в рециклінгу відходів та раціональному
використанні природних ресурсів»
(остаточний)

Науковий керівник НДР

_____ Леонід ПЛЯЦУК

Термін виконання: 01.08.2022 р.-31.12.2022 р.

2022

Рукопис закінчено 14.12.2022 р.

Результати роботи розглянуто Вченою Радою СумДУ, протокол від __ __ 2022 року №

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР Доктор технічних наук, професор	14.12.2022	Л. Д. Пляцук
Відповідальний виконавець Доктор технічних наук	14.12.2022	Є.Ю. Черниш (реферат; вступ; розділ 1, п. 1.2; розділ 2, п. 2.2, п.2.3)
Старший науковий співробітник, докторант кафедри екології та природозахисних технологій	14.12.2022	І.Ю. Аблєєва (розділ 1, п. 1.1)
Старший науковий співробітник, кандидат технічних наук	14.12.2022	І.В. Васькіна (розділ 3, п. 2.1)
Старший науковий співробітник, кандидат технічних наук	14.12.2022	Є.В. Батальцев (розділ 2, п. 2.4)
Молодший науковий співробітник, аспірант кафедри екології та природозахисних технологій	14.12.2022	О. М. Богданович (розділ 3, п. 3.1)
Молодший науковий співробітник, аспірант кафедри екології та природозахисних технологій	14.12.2022	В. С. Чубур (розділ 3, п. 3.2, 3.3; висновки)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 63 с., 2 табл., 33 рис., 51 джерело, 3 додатки.

БІОЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, БІОМЕТАН, ДОБРИВА,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ БІОМЕТАНОГЕНЕЗУ,
РЕЦИКЛІНГ ВІДХОДІВ

Об'єктом дослідження є процеси екологічно безпечної утилізації відходів в раціональному природокористуванні, зокрема таких як фосфогіпс та органічні відходи різного генезису в енергетичних цілях.

Предмет дослідження НДР – розробка науково-методичних підходів та практичних рекомендацій щодо залучення органічних та хімічних відходів як сировинного ресурсу в біоенергетичні технологічні рішення.

Мета проведення НДР полягає у розробленні інноваційної концепції для ланцюга біопроектів виробництва корисних біоосновних продуктів, починаючи з попередньої обробки органічних та хімічних відходів, зберігання та анаеробну конверсію їх з отриманням біометану та органо-мінерального добрива з порівняльною оцінкою за допомогою методики життєвого циклу.

У першому розділі звіту: здійснено оцінювання потенціалу аграрних відходів для виробництва зеленої енергії при сумісній утилізації з фосфогіпсом з використанням SWOT аналізу, також розглянуто зспдт реалізації методики життєвого циклу для оцінки екологічної безпечності біоенергетичних технологій у системі раціонального природокористування та рециклінгу відходів.

У другому розділі звіту: розроблено експериментальний комплекс утилізації фосфогіпсу разом з органічними відходами в біоенергетичних технологіях, зокрема установки електроферментації та ультразвукової попередньої обробки відходів.

У третьому розділі звіту: здійснено експериментальне дослідження процесів інтенсифікації анаеробного збродження та електроферментації органічних відходів разом із фосфогіпсом в біоенергетичних технологіях із

виробництвом біопродуктів з доданою вартістю, а саме біометану та органічно-мінерального добрива, комплексний аналіз утилізації фосфогіпсу з використанням методології аналізу життєвого циклу.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	6
Вступ	7
1 Еколого-соціо-економічні засади сумсної утилізації відходів з отриманням корисних біопродуктів та енергії.....	10
1.1 Оцінка потенціалу аграрних відходів для виробництва зеленої енергії при сумісній утилізації з фосфогіпсом з використанням SWOT аналізу	10
1.2 Залучення методики життєвого циклу для оцінки екологічної безпечності біоенергетичних технологій у системі раціонального природокористування та рециклінгу відходів	15
2 Експериментальний комплекс утилізації фосфогіпсу разом з органічними відходами в біоенергетичних технологіях	21
2.1 Характеристика органічних відходів як сировини для переробки в біоенергетичних технологіях.....	21
2.2 Характеристика фосфогіпсу як мінеральної добавки в анаеробному збродженні.....	22
2.3 Експериментальні установки дослідження виробництва біогазу..	23
2.4 Методика нейромережевої реалізації Data Mining анаеробних процесів	26
3 Розроблення способу біохімічної переробки фосфогіпсу разом з органічними відходами з виробництвом біопалива	30
3.1 Дослідження процесу інтенсифікації виробництва біогазу за допомогою електроферментації із застосуванням нейромереж	30
3.2. Дослідження ультразвукової інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом із фосфогіпсом	36
3.3 Комплексний аналіз утилізації фосфогіпсу під час анаеробного зброджування органічних відходів з використанням методології аналізу життєвого циклу	43
Висновки	48
Перелік джерел посилання	51
Додатки	56

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ФГ – фосфогіпс

LCA – Методологія оцінки життєвого циклу

ХСК – хімічне споживання кисню

ОВП – окисно-відновний потенціал

TDS – загальна мінералізації речовини

pH – водневий показник

RBFN – радіальна базисна нейронна мережа

РБФ – радіальна базисна функція

НМ – нейронна мережа

ЄС – Європейський Союз

НДР – науково-дослідна робота

ВСТУП

Технічні рішення біогазового виробництва досить часто є ключовим елементом кругової циркулярної біоекономіки та стратегічним засобом одночасного управління відходами і виробництва відновлюваної енергії, палива та біодобрив.

В Україні, частка біоенергетики в загальній структурі споживання енергії дуже низька, але перспективна та її розвиток є стратегічно важливим для після воєнного відновлення України. Станом на кінець 2021 року в Україні 77 біогазових підприємств, з них лише 46 працюють на сільськогосподарських та промислових відходах [1]. На початок 2021 року за «зеленим тарифом» виробляли енергію з біогазу 53 установки. Їх загальна електрична потужність склала 103,4 МВт, а потужність окремих реакторів становила від 0,125 МВт до 5,7 МВт [2-3]. Відповідно до нового Проєкту Національного плану дій з відновлювальної енергетики на період до 2030 року, заплановано очікування від джерела біогазу досягнення виробництва енергії 633 МВт та 2533 ГВт-год станом на 2030 рік, з початкових показників 2020 року 103 МВт та 471 ГВт-год енергії [4]. Крім того, можливість підвищення ефективності біогазової промисловості забезпечує використання дигестату в якості органічного добрива.

Наразі держане регулювання щодо управління дигестатом в Україні перебуває на рівні рекомендацій до ухвалення вдосконалення законопроєкту у сфері поводження з пестицидами та агрохімікатами стосовно поняття та вимог до державної реєстрації дигестату біогазових установок [5-7]. Впровадження дигестату в сільське господарство є надзвичайно важливим для зменшення використання хімічних добрив.

На практиці вибір сировини для метанового зброджування зазвичай залежить від доступної сировинної бази на місцях локалізації, а також визначається підбором складу з метою оптимізації виробництва біогазу. Крім того, застосування стимулюючих анаеробне збродження добавок для

покращення якісних та кількісних показників метаногенезу та екологічних властивостей дигестату є першочерговим [8, 9]. В цьому напрямі можливо пропонується використовувати такий хімічний відхід як фосфогіпс (ФГ). Він складається в основному з кальцій сульфат дигідрату, а також містить домішки фосфату, що не розкладається, та силікати. На цей час в Європі нараховується 51 об'єктів з виробництва добрив [10]. В той час як в Україні лише 15 крупних промислових об'єктів, з яких 5 виробляють фосфатні мінеральні добрива [11]. Лише в Україні у відвалах накопичено понад 50-65 млн тонн ФГ.

Об'єктом дослідження є процеси екологічно безпечної утилізації відходів в раціональному природокористуванні, зокрема таких як ФГ та органічні відходи різного генезису в енергетичних цілях.

Предмет дослідження НДР – розробка науково-методичних підходів та практичних рекомендацій щодо залучення органічних та хімічних відходів як сировинного ресурсу в біоенергетичні технологічні рішення.

Мета проведення НДР полягає у розробленні інноваційної концепції для ланцюга біопроектів виробництва корисних біосировинних продуктів, починаючи з попередньої обробки органічних та хімічних відходів, зберігання та анаеробну конверсію їх з отриманням біометану та органо-мінерального добрива з порівняльною оцінкою за допомогою методики життєвого циклу (LCA).

Для реалізації зазначеної мети були поставлені і виконані такі завдання:

- здійснити аналіз еколого-соціо-економічних засад сумісної утилізації відходів для потреб зеленої енергетики з отриманням корисних біопродуктів;
- розробити експериментально-методичний комплекс реалізації процесів утилізації органічних відходів разом із ФГ в енергетичних цілях;
- провести моделювання процесу інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом з ФГ під час електроферментації;
- дослідити процес інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів при додаванні ФГ в систему із використанням ультразвукової обробки;

- здійснити формалізацію синергетичної дії сумсної обробки відходів під час анаеробного збродження та електроферментації;
- здійснити комплексний аналіз утилізації ФГ під час анаеробного зброджування органічних відходів з використанням методології аналізу життєвого циклу;
- розробити спосіб біохімічної переробки різних видів відходів у корисні продукти з виробництвом біопалива.

Дослідження процесів анаеробного збродження з попередньою ультразвуковою обробкою та електроферментації здійснювались в лабораторії «Біогазові технології» кафедри екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету (СумДУ). На базі лабораторії було досліджено фосфогіпс як мінеральний ресурс для мікробних асоціацій в анаеробному зброджуванні органічних відходів за різних умов попередньої обробки для інтенсифікації біометаногенезу, а також здійснена оцінка властивостей відходів бродіння як органо-мінерального добрива з використанням підходу оцінки життєвого циклу. Здійснено дослідно-промислове випробування технології отримання гранульованого органо-мінерального добрива на базі Сумського ДНДІ «МІНДІП» м. Сум, що підтвердило її працездатність (Додаток А). Крім того, в межах співробітництва виконавиця цього НДР із української сторони брала участь у науковому стажуванні, що відбувалося в партнерській організації у Празі (Додаток Б). Для поширення результатів спільного НДР проводилась співпраця із Чеським природничим університетом м. Праги також в освітній сфері під час реалізації програми міжнародної віртуальної мобільності для здобувачів вищої освіти СумДУ спеціальностей 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища» в межах спільного курсу «Sustainable Biotechnology and Environmental Protection» (Додаток В).

1 ЕКОЛОГО-СОЦІО-ЕКОНОМІЧНІ ЗАСАДИ СУМСНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ З ОТРИМАННЯМ КОРИСНИХ БІОПРОДУКТІВ ТА ЕНЕРГІЇ

1.1 Оцінка потенціалу аграрних відходів для виробництва зеленої енергії при сумісній утилізації з фосфогіпсом з використанням SWOT аналізу

Кризова ситуація в агропромисловому комплексі тісно пов'язана з вирішенням продовольчої проблеми, досягнення належного рівня екологічної безпеки, визначення заходів щодо охорони та підвищення родючості земель. Для визначення можливих сильних (переваг), слабких сторін, можливостей та загроз розвитку біогазових установок в Україні було використано SWOT-аналіз. Цей метод являє собою процес встановлення зв'язків між характеристиками, згаданими вище, результати якого можуть бути використані в подальшому для формулювання та вибору стратегій компанії. Методологія SWOT-аналізу базується на підході, який дозволяє вивчати як зовнішнє, так і внутрішнє середовище, як показано на рис 1.1.



Рисунок 1.1 - Узагальнена схема врахування залежних та незалежних факторів при проведенні SWOT-аналізу

1) SO Альтернативи - передбачають розробку стратегій підтримки та розвитку сильних сторін біогазових станцій з метою реалізації можливостей зовнішнього середовища;

2) ST Альтернативи - орієнтують стратегію на боротьбу із загрозами шляхом використання внутрішніх резервів (сильних сторін);

3) WO Альтернативи - спрямовують дії біогазового заводу на використання можливостей для подолання слабких сторін його внутрішнього потенціалу;

4) WT Альтернативи - передбачають розробку такої стратегії, яка б дозволила біогазовому заводу посилити свій потенціал та відвернути можливі загрози у зовнішньому середовищі.

SWOT-аналіз може бути застосований в процесі стратегічного планування розвитку біогазових технологій в Україні, що може вирішити питання впровадження екологічних орієнтирів розвитку біопалива та біодобрив. Але в Україні існує проблема щодо невизначеності самого поняття "дигестат" будь-яким законодавчим документом, відсутність нормативних вимог до виробництва, що безумовно гальмує процес ефективного використання дигестату як добрива [12].

У 2021 році під час засідання Комітету з питань аграрної та земельної політики Верховної Ради України було прийнято рішення підтримати проєкт Закону про внесення змін до Закону України "Про пестициди та агрохімікати" щодо державної реєстрації дигестату біогазових установок. Документом пропонується законодавче визначення терміну "дигестат", а скасування державної реєстрації для дигестату біогазових установок, що використовується як органічне добриво або поліпшувач ґрунту, за умови його відповідності чинним санітарним нормам та іншим нормативно-правовим актам, відкриє нові можливості для рекультивації ґрунтів у майбутньому [13].

Основними факторами, що визначають спосіб використання дигестату, є його якість, місцеві умови, нормативні акти та документи. Удобрення полів дигестатом дає багато переваг, наприклад: зменшення потреби в засобах

захисту рослин, зменшення неприємного запаху та знищення можливих патогенних мікроорганізмів. У роботі [14] досліджували два поля, які були засіяні люцерною, одне поле удобрювали мінеральним добривом, а інше - дигестатом. У люцерні, яка удобрювалася дигестатом, спостерігалось збільшення вмісту макроелементів порівняно з люцерною, яка удобрювалася мінеральним добривом. Отже, залишки після ферментації біогазової установки можна використовувати як добриво.

Перетворення дигестату в каталізatori на основі біовугілля є однією із стратегій переробки та утилізації вторинних ресурсів. Активні центри в біовуглецах безпосередньо корелюють з утворенням активних форм в пероксимоносульфатній системі. Встановлення кореляції між структурою та ефективністю біовугілля, отриманого з дигестату, є важливим для розкладання забруднюючих речовин [15, 16].

Біотехнологічні галузі, які використовують анаеробне зброджування, використовують широкий спектр сировини та хімічних речовин і виробляють багато видів продукції в різних формах. Найбезпечнішим способом забезпечення біобезпеки біотехнологічних виробництв є організація виробництва асептичним способом. Однак при анаеробному знезараженні рідких і твердих органічних відходів різного походження (міські стічні води, промислові стічні води, тверді побутові відходи, відходи сільського господарства) немає необхідності використовувати методи стерилізації. В результаті використання технології анаеробного зброджування крім санітарного знезараження відходів, зберігаються їх поживні речовини. Тому тверді залишки метанового бродіння (близько 40% від початкової кількості) використовуються як добрива для рослинних культур. У збродженій біомасі мінералізація становить 60% і мінеральні речовини переходять у доступну для рослин форму. Застосування таких біодобрив зменшує частку використання мінеральних добрив при вирощуванні сільськогосподарських культур. Отримане біодобриво за більшістю критеріїв у декілька разів перевершує інші органічні добрива, такі як гній, гній або торф. Деякі з них наведені нижче [17]:

- 1) відсутність насіння бур'янів;
- 2) відсутність патогенної мікрофлори;
- 3) наявність активної мікрофлори (у забрудненій масі міститься близько 10¹⁴ колоній мікрофлори на грам), яка інтенсифікує ріст рослин
- 4) відсутність періоду адаптації (ферментовані добрива, завдяки своїй формі, проявляють ефективність відразу після внесення в ґрунт)
- 5) стійкість до вимивання поживних речовин з ґрунту (вимивається не більше 15%, тому добриво не втрачає своєї ефективності на 3-5 років довше, ніж звичайне);
- 6) максимальне збереження та накопичення азоту (за рахунок анаеробного зброджування органічних відходів в біогазовій установці повністю зберігається кількість загального азоту, крім того вміст розчинного азоту NH₄ збільшується на 10 - 15%);
- 7) екологічний вплив на ґрунт, оскільки це абсолютно чисте екологічне добриво.

Результати ідентифікації сильних та слабких сторін, можливостей та загроз для розвитку біогазових установок в Україні представлено у вигляді матриці SWOT-аналізу на рис. 1.2, що дозволило визначити та аргументувати основні альтернативні стратегії покращення поводження з органічними відходами в Україні.

Зовнішні середовище	
<p><i>(0) Можливості</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Рациональне використання органічної біомаси з відновленням компонентів екосистеми • Зовнішня фінансова підтримка (гранти, фінансовані програми) виробництва екологічних добрив з відходів • Консолідація невеликих фермерських господарств на підтримку кооперативної переробки відходів • Економічна рентабельність переробки відходів як джерела енергії • Зменшення екологічних ризиків з вигідною ціною на електроенергію для внутрішнього споживання • Підтримка енергетичної стратегії України щодо отримання енергії з відновлюваних джерел • Виконання рекомендацій відповідно до закону про відходи щодо попередження утворення відходів, їх збирання, перевезення, сортування, зберігання, обробки, переробки, утилізації, виділення, знешкодження та захоронення. • Розширення місцевої електромережі. • Можливість продажу тепла та газу. • Постійно зростаючий попит на електроенергію. • Можливість переробки відходів біомаси. • Нові робочі місця в тепловій енергетиці. 	<p><i>(1) Загрози</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Нестабільність вартості через варіативність біогазового прибутку. • Економічна нестабільність підприємства через витрати на встановлення та термін окупності. • Мінливість цін на біомасу та складові у забезпеченні стабільного постачання. • Необхідність замовлення обладнання з-за кордону. • Падіння цін на традиційні види палива. • Падіння земельного податку та податку на нерухомість. • Зупинка виробництва, що постає субстратом для біогазових установок. • Епідемія гварин, неврожай поля. • Періодичні стихійні лиха.
<p><i>(5) Сильні сторони</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Посильне енергозалежність, когенерацію зеленої енергії та тепла з відходів. • Більш стабільне джерело енергії на підприємствах у порівнянні з іншими відновлюваними джерелами енергії. • Збільшення попиту на органічні добрива. • Зменшення виходів парникових газів від розкладання рослинних решток та гною на полі. • Збалансоване органічне добриво за вмістом NPK у вигляді дигестату. • Покращення якості ґрунту завдяки збалансованому внесенню органічних речовин • Позитивний ефект від утилізації • Зменшення витрат на збирання і транспортування гною. • Наявність дешевої біомаси у великих кількостях. • Нові робочі місця. • Відносно проста у впровадженні технологія. 	<p><i>SO-Альтернативи</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Координація з іншими комплементарними програмами, наприклад, екологічними енергетичних технологіях. • Впровадження законодавчого регулювання в Україні використання дигестату як біодобрива.
<p><i>(11) Слабі сторони</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Відсутня стратегія довгострокового управління відходами, що біологічно розкладаються. • Проблеми з недовірливим складом біомаси. • Органічне замірство менш конкурентоспроможне. • Недостатня обізнаність фермерів щодо можливостей утилізації відходів та екологічного ефекту. • Високі інвестиційні витрати, потреба в дорогому обладнанні та установках для попередньої обробки та анаеробного зброудкування. • Висока собівартість виробництва електроенергії порівняно з іншими відновлюваними джерелами. • Нестабільність законодавства у сфері відновлюваної енергетики в Україні та ринку електроенергії. • Проблема з управлінням теплом під час опалювального сезону. • Неприємний запах. • Ризик вибуху метану. • Висока вартість підключення біогазової установки до електромережі. 	<p><i>ST-Альтернативи</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Використання підтримки міжнародних компаній у вигляді інвестицій в нові біогазові установи та безоплатної передачі обладнання. • Орієнтація на місцевий субстрат для біогазових установок.
<p><i>WO-Альтернативи</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Розвиток ринку місцевими учасниками та підтримка на державному рівні. • Підготовка персоналу технічної підтримки та навчання фермерів. 	<p><i>IT-Альтернативи</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Впровадження успішного зарубіжного досвіду встановлення біогазових установок. • Використання аварійних систем для запобігання природним і техногенним катастрофам. • Використання відповідних технологій попереднього очищення для мінімізації екологічних ризиків.

Внутрішні середовище

Рисунок 1.2 - Матриця SWOT-аналізу для України щодо розвитку біогазових установок та покращення поводження з органічними відходами

Вивчаючи питання утилізації відходів сільського господарства шляхом переробки їх в біогазових установках, можна зробити висновок, що дана технологія дозволяє вирішити дві ключові проблеми:

- 1) екологічну - анаеробне зброджування відходів, особливо тваринництва з отриманням біодобрив різного типу для рекультивації ґрунтів;
- 2) енергетична - утилізація відходів з метою отримання біогазу для заміщення вичерпних видів палива.

Попит на світові природні ресурси перевищив пропозицію та спричинив зростання цін у міру відновлення економік після пандемії COVID-19. Це призвело до глобальної кризи вартості життя, яка 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. Пошук новітніх методів переробки відходів та їх подальше впровадження в агропромисловий комплекс дозволить Україні стати на шлях економічної та енергетичної незалежності у час післявоєнного відновлення. Економічні вигоди від використання біогазу залежать від типу відходів, доступних для переробки, інвестиційних можливостей, наявності місцевого енергетичного ринку та урядових ініціатив.

1.2 Залучення методики життєвого циклу для оцінки екологічної безпечності біоенергетичних технологій у системі раціонального природокористування та рециклінгу відходів

Для розробки належної системи раціонального природокористування та рециклінгу відходів може бути обрано декілька процесів, технологій та методів, що дозволяють проводити об'єктивне порівняння між альтернативами. З метою порівняння можливих альтернативних сценаріїв можна використовувати оцінку життєвого циклу з оціночною сіткою, в якій відображаються різні екологічні параметри.

Методологія оцінки життєвого циклу (LCA) може підтримувати прийняття рішень державними та приватними суб'єктами з метою пошуку найкращого рішення для управління відходами [18].

Методика життєвого циклу складається з чотирьох етапів [19]:

Етап 1: Мета та сфера застосування має на меті визначити, яку частину життєвого циклу продукції буде взято для оцінки та для чого буде слугувати оцінка. На цьому етапі описуються критерії, що слугують для порівняння систем, та конкретні періоди часу.

Етап 2: На цьому етапі аналіз інвентаризації дає опис матеріальних та енергетичних потоків у системі продукції та особливо її взаємодії з навколишнім середовищем, споживаної сировини та викидів у навколишнє середовище. Всі важливі процеси та допоміжні енергетичні та матеріальні потоки описуються пізніше.

Етап 3: Деталі аналізу інвентаризації слугують для оцінки впливу. На цьому етапі деталізуються результати індикаторів усіх категорій впливу; важливість кожної категорії впливу оцінюється шляхом нормалізації, а в кінцевому підсумку - шляхом зважування.

Етап 4: Інтерпретація життєвого циклу включає критичний аналіз, визначення чутливості даних та представлення результатів

Проаналізувавши дослідження оцінки життєвого циклу поводження із органічними відходами [20-24] виділено наступні можливі сценарії поводження: недиференційований збір; захоронення на полігоні; механічна та біологічна обробка; спалювання на сміттєспалювальних заводах; поєднання анаеробного зброджування зі спалюванням; анаеробне зброджування супроводжується компостуванням твердого дигестату; роздільне збирання та виробництво високоякісного компосту; комбіноване виробництво біогазу та компостування; гідротермальна карбонізація.

За наведеними сценаріями використовувалися індикаторами категорій впливу оцінки життєвого циклу, що наведені в таблиці 1.1.

Оцінки життєвого циклу є важливим інструментом для порівняння нової концепції біопереробного заводу із захороненням відходів на полігоні. Конкретизуючи вплив установок анаеробного зброджування на навколишнє середовище на окремих видах субстратів, стації що впливають наведено на рис. 1.3.

Таблиця 1.1 - Дослідження з оцінки життєвого циклу для поводження з органічними відходами

Сценарії поводження з відходами	Категорії впливу	Характеристика	Джерело
(1) недиференційований збір з подальшою біостабілізацією органічної фракції та її остаточним захороненням на полігоні/ (2) роздільний збір органічної фракції з подальшим виробництвом компосту	<ul style="list-style-type: none"> • Канцерогени / неканцерогени (кг C₂H₃Cl екв) • Кількість дрібних частинок (кг PM_{2,5} екв) • Іонізуюче випромінювання (Бк С-14 екв) • Виснаження озонового шару (кг CFC-11 екв) • Дрібнодисперсні органічні речовини (кг C₂H₄ екв) • Водна екотоксичність (кг ТЕГ води) • Наземна екотоксичність (кг ТЕГ ґрунту) • Наземні кислоти/поживні речовини (кг SO₂ екв) • Зайнятість земель (м² орної землі) • Підкислення води (кг SO₂ екв) • Водна евтрофікація (кг PO₄ P-ліміт) • Глобальне потепління (кг CO₂-екв) • Невідновлювана енергія (МДж первинна) • Видобуток корисних копалин (МДж додатково) 	<p>Аналіз сценаріїв на прикладі країни Італія, продемонстрував, що (1) має найкращі показники в десяти з п'ятнадцяти категорій впливу, що розглядаються, в той час як (2) характеризується найнижчим впливом в категоріях "Канцерогени", "Зайнятість земель", "Евтрофікація водних ресурсів", "Глобальне потепління" та "Видобуток мінеральних ресурсів". Враховуючи фактичні показники процесу біостабілізації, (2) може бути найбільш сприятливим сценарієм лише за умови значного скорочення викидів в атмосферу (зокрема, сірководню, твердих частинок, аміаку та НМЛОС). На рівні кінцевих точок (2) має найкращий показник за категорією "Збиток від зміни клімату".</p>	[20]

Продовження табл. 1.1

Сценарій поведінки з відходами	Категорії впливу	Характеристика	Джерело
(1) сміттєспалувальні заводи / (2) комбіноване виробництво біогазу та компостування / (3) механічна та біологічна очистка	<ul style="list-style-type: none"> • Глобальне потепління • Виснаження озонного шару • Підкислення • Наземна евтрофікація • Прісноводна евтрофікація • Морська евтрофікація • Канцерогенність • Виснаження абіотичних ресурсів – вичерпні • Утворення специфічної речовини • Виснаження абіотичних ресурсів - елементи • Екотоксичність • Іонізуюче випромінювання 	<p>На прикладі дансько-німецькому регіону, сценарій (1) показав кращі екологічні показники в 10 з 14 оцінених категорій впливу, однак чотири категорії впливу мають або значення, дуже близькі до нульового впливу ("Іонізуюче випромінювання" та "Виснаження озонного шару"), або занадто високу невизначеність, щоб робити висновки ("Канцерогенність" та "Екотоксичність"). Сценарій (3) мав лише навантаження на навколишнє середовище, оскільки об'єкт не замінював жодних товарів і використовував електроенергію та дизельне паливо, а також мав прямі викиди, пов'язані з обробкою, такі як закис азоту. Комбінований метод (2) мав найскладніші екологічні показники як з точки зору заміщення електроенергії та компостних добрив, так і з точки зору великих прямих викидів, особливо метану, закису азоту та аміаку. Скорочення викидів аміаку від біогазових установок, може покращити загальні екологічні показники системи.</p>	[21]
(1) анаеробне зброджування, що супроводжується компостуванням твердого дигестату / (2) спалюванням / (3) анаеробне зброджування з подальшим спалюванням	<ul style="list-style-type: none"> • Глобальне потепління • Виснаження корисних копалин • Водна екотоксичність • Прісноводна евтрофікація • Токсичність для людини • Морська евтрофікація • Виснаження металів • Утворення специфічної речовини • Фотохімічне окислення • Наземна кислотність • Наземна евтрофікація 	<p>Анаеробне розкладання з подальшим компостуванням (1) найкраще відповідає економічним та екологічним аспектам. - Спалювання (2) показало порівнянний вплив на навколишнє середовище, але збільшило вирівнювану вартість енергії. Система (3) не призвела до зменшення навантаження на навколишнє середовище, а витрати перевищили інші варіанти.</p>	[22]
(1) анаеробне зброджування / (2) спалювання / (3) гідротермальна карбонізація	<ul style="list-style-type: none"> • Глобальне потепління • Виснаження озонного шару • Виснаження корисних копалин • Утворення специфічної речовини • Наземна кислотність • Канцерогенність • Прісноводна евтрофікація • Морська евтрофікація 	<p>Сценарій (1) є кращим шляхом переробки для органічної фракції ТПВ та харчових відходів, якщо не порушується процес евтрофікації. Реалізація етапу (3) може виявитися доцільною для органічної фракції ТПВ та харчових відходів за певних обставин. Важливо, що тепло повинно забезпечуватися невичерпним ресурсом, що може бути досягнуто, якщо анаеробне зброджування поєднується з процесом гідротермальної карбонізації.</p>	[23]

Закінчення табл. 1.1

Сценарії поводження з відходами	Категорії впливу	Характеристика	Джерело
(1) відходи без обробки / (2) полігон / (3) відходи спрямовуються на виробництво добрив та анаеробне збродження	<ul style="list-style-type: none"> • Абіотичне виснаження (кг Sb-екв.) • Підкислення (кг SO₂-екв.) • Евтрофікація (кг PO₄-екв.) • Глобальне потепління на 100-річному часовому горизонті (кг CO₂-екв.) • Виснаження озонового шару за 40-річний часовий горизонт (кг CFC11-екв.) • Фотохімічне окислення (кг C₂H₄-екв.) 	Збродження відходів (3) було корисним для виробництва енергії, але використання дигестатів на землі було шкідливим для навколишнього середовища через підвищений потенціал евтрофікації. Захоронення відходів на полігоні (2) мало більший вплив, ніж біопереробний завод, в основному в категоріях глобального потепління - через неорганізовані викиди метану, евтрофікації навколишнього середовища та фільтрацію фільтратів до підземних вод та фотохімічне окислення.	[24]

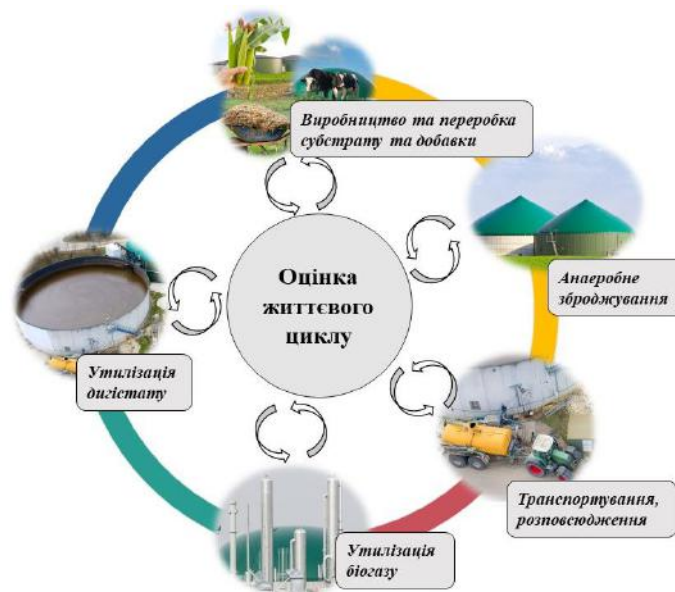


Рисунок 1.3 - Етапи оцінки життєвого циклу утилізації органічних відходів шляхом анаеробного збродження з отриманням біогазу

Екологічний ефект біогазових установок протягом повного життєвого циклу може бути додатково покращений за рахунок належної

сільськогосподарської практики внесення дигестату, а також за рахунок скорочення кількості викопного палива при вирощуванні та транспортуванні енергетичних культур [25].

Загалом, застосування оцінки життєвого циклу до систем управління відходами має великий потенціал, особливо в підтримці рішень планувальників та компаній, які здійснюють діяльність зі збору, транспортування та утилізації відходів.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС УТИЛІЗАЦІЇ ФОСФОГІПСУ РАЗОМ З ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ В БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

2.1 Характеристика органічних відходів як сировини для переробки в біоенергетичних технологіях

Характеристика пташиного посліду

Пташиний послід був наданий приватним домогосподарством (Сумська область, Україна). Він мав частинки розміром 0-1 мм. Значна частина поживних речовин у тваринному посліді знаходиться у водорозчинній формі.

Сирий пташиний послід містить до 5,5% азоту, до 4,5% фосфору, 2,5% калію, магнію та багато інших мікроелементів. Маса сирого пташиного посліду мала вологість 70-75%, а рН розведеного у воді посліду коливався від 8 до 9. Показники курячого посліду використаного в експериментах були на рівні вмісту нітрогену 10,65 г/кг, амонію 7,1 г/кг та показника ХСК 317,75 г/кг.

Характеристика коров'ячого гною

В дослідках було використано твердофазний гній зі значенням рН 7,4 розведеного у воді та показником ХСК 198,59 г/кг. Вміст азоту сирого коров'ячого гною становив 0,42 г/кг, та амонію 3,78 г/кг, за вмісту органічної речовини 16,27 %.

Характеристика свинячого гною

Щодня одна вирощена свиня виробляє близько 5 кг гною. Ці відходи на 90% складаються з води і на 7% - з летючих речовин, з яких можна виробляти 4,8 кубічних футів біогазу щодня. Не рекомендується використовувати тільки свинячий гній, оскільки він має високий вміст азоту і низький вміст вуглецю. Він також є дуже лужним, тобто може пригнічувати ріст метаноутворюючих бактерій. Але можна покращити виробництво біогазу зі свинячого гною, змішуючи його з коров'ячим гноєм або біомасою. В дослідках було використано рідкофазний гній (вмісту органічної речовини 0,7 %) з рН 7,6, показником ХСК 79,98 г/кг, вмістом нітрогену 5,92 г/кг та амонію 4,02 г/кг.

2.2 Характеристика фосфогіпсу як мінеральної добавки в анаеробному збродженні

Фосфогіпс - це сірий, вологий, дрібнозернистий матеріал з 50-75% частинок розміром менше 0,075 мм і максимальним розміром зерен від 0,5 до 1,0 мм (рис. 3). Вологість зазвичай коливається від 8 до 30% [26]. Рівень рН у відвалах Сумської області коливається від 5,0 до 7,7 одиниць. Екологічні проблеми та збільшення витрат на складування ФГ вимагають його кращого використання [27-29]. Відбір зразків ФГ було взято з діючого масиву відвалів у Сумському регіоні (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Відвал ФГ в Сумській області (Україна), 2022 рік

Хімічний склад залежить від походження та переробки фосфоритів [30]. Фосфогіпс мокрого способу виробництва складається в основному з $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ (95%) або $\text{CaSO}_4 \times 1/2\text{H}_2\text{O}$.

У відібраних для обробки зразках в процесі скануючої мікроскопії виявлені наступні концентрації елементів, мг/г: Zn - 0,017, Cr - 0,010, Cd -

0,005, Cu - 0,005, Pb - 0,004, які в цілому не перевищують гранично допустимі концентрації цих елементів у добривах [31].

Варто зазначити, що добавка ФГ може використовуватися в різних процесах біоконверсії (анаеробної та аеробної) для стимуляції росту різних видів бактерій. Таким чином, можна інтенсифікувати вивільнення фосфату в розчин з подальшим його осадженням за допомогою реагентів та одержанням високоякісного комплексного органо-мінерального добрива.

2.3 Експериментальні установки дослідження виробництва біогазу

Експериментальний стенд процесу анаеробного бродіння зображений на рис. 2.5. Він складається з чотирьох біореакторів, що являють собою герметичні ємності із хімічно стійкого скла (1) з газовідвідними трубками, за допомогою яких біогаз збирається в газовідбірні пакети (2), а в верхній частині реакторів є патрубки для відбору рідких проб (3) для контролю фізико-хімічних показників процесу збродження. Для підтримки постійної температури на рівні 35°C біореактори було розміщено у водяну баню (4).

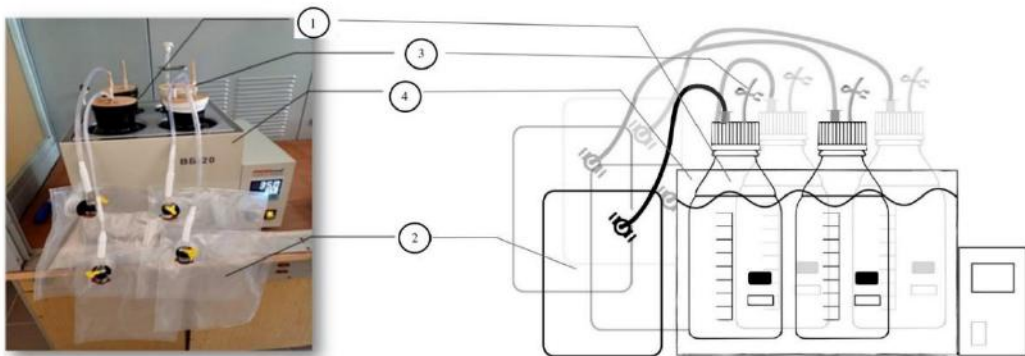


Рисунок 2.5 – Лабораторна установка звичайного біореактора: 1 – скляні біореактори; 2 – газовідбірні пакети; 3 – патрубки для відбору рідких проб; 4 – корпус водяної бані

Біореактор скомбінований з електролізною установкою (рис. 2.6) являє собою ємність (1) для анаеробного зброджування з додатково вбудованими в кришку з газовідвідним виходом (2) катодом (3) і електродом (4). Завдання даного реактора не тільки забезпечувати умови для анаеробного зброджування, а так само виконувати електролізну обробку субстратів у період здійснення процесів. Графітові стрижні слугують катодом і анодом, вони розділені між собою мембраною (5) у співвідношенні 2/3 об'єму катодної частини і 1/3 об'єму реактора анодної частини. Також кожна частина біореактора має окремий вивід для відбору проб у процесі зброджування (6).

Обробка електричним струмом проводиться 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 відповідно до попередніх досліджень [32, 33].

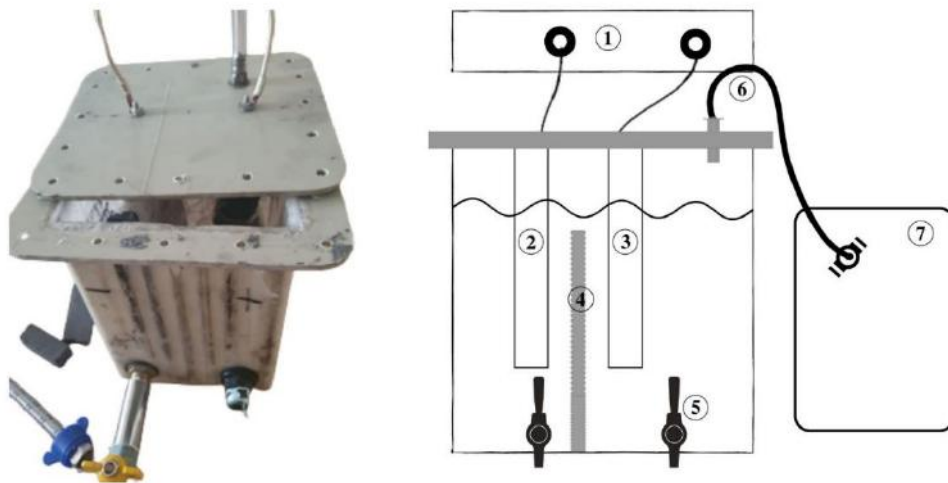


Рисунок 2.6 - Лабораторний стенд біореактора, скомбінований з електролізною коміркою: 1 - джерело живлення, 2 - анод, 3 - катод, 4 - напівпроникна мембрана, 5 - кран для відбору проб, 6 - кран для виходу біогазу, 7 – газгольдер

Завантаження біореактора субстратом та інокулятом відбувається на рівні до 75% об'єму ємності. Анаеробний процес завантаженої в біореактор

сировини активізується в анаеробних умовах, відсутності світла та мезофільному температурному режимі. З початку періоду газоутворення склад біогазу аналізувався газоаналізатором Geotech BIOGAS 5000.

На рис. 2.7 представлена експериментальна лабораторна установка ультразвукової обробки. Ультразвукове обладнання, що складається з 3 перетворювачів розміщених в секції, потужністю 200 Вт і частотою 30 кГц. Час ультразвукової обробки складав 3 хвилини. Час обробки змінювався в діапазоні від 1 до 6 хвилин.

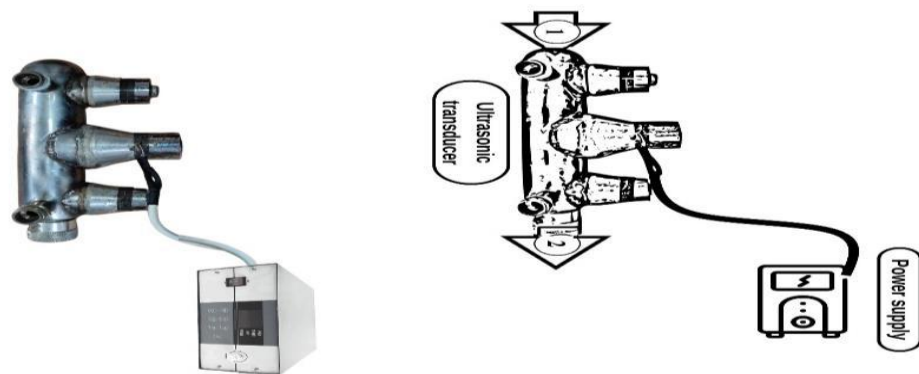


Рисунок 2.7 – Лабораторна установка ультразвукової обробки:

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

Рідка фаза речовини заливається в ємність обробки через спеціальні отвори, рівномірно розподіляючись по площі поперечного перерізу об'єму ультразвукової камери. У процесі роботи установки генеруються ультразвукові коливання. Вектор розподілу ультразвукових коливань є перпендикулярним до поверхонь плавних переходів. Таким чином, у внутрішньому об'ємі резервуара створюється ультразвукове поле з достатньою інтенсивністю для формування і підтримки прогресивного режиму кавітації у всьому об'ємі резервуара.

Моніторинг параметрів процесів інтенсифікації анаеробного збродження [34] здійснювався за показниками рН, окисно-відновного потенціалу (ОВП), загальної мінералізації речовини (TDS), та якісним та кількісним компонентним складом біогазу.

2.4 Методика нейромережевої реалізації Data Mining анаеробних процесів

Як модель нейрона було обрано бінарний пороговий елемент, що обчислює зважену суму вхідних сигналів і формує на виході сигнал величини 1, якщо ця сума перевищує певне порогове значення, і 0 - в іншому випадку [35]. До теперішнього часу ця модель не зазнала серйозних змін. Було введено нові види активаційних функцій. Структурну модель технічного нейрона представлено на рис. 2.8.

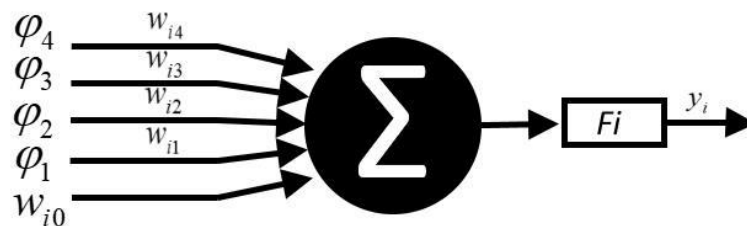


Рисунок 2.8 - Формальна модель штучного нейрона

Стан нейрона визначається за формулою:

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

де φ - безліч сигналів, що надходять на вхід нейрона,
 w_i - вагові коефіцієнти нейрона.

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

$$y = F\left(\sum_{i=1}^n w_i \varphi_i + w_0\right),$$

де n - розмірність вектора входів,

w_0 - "нейронний зсув", що вводиться для ініціалізації мережі, - під'єднується до незмінного входу $+1$,

F - активаційна функція нейрона.

Відповідно відпрацьованості та функціональної надійності, для аналізу анаеробних процесів обробки пташиного посліду з електролізною та ультразвуковою інтенсифікацією використовуються два види нейронних мереж (НМ):

- багат шаровий персептрон;
- НМ радіально-базисної функції.

Інший вид використовуваної для Data Mining анаеробних процесів НМ - нейромережа на основі радіально-базисної функції. У загальному випадку під радіальною базисною нейронною мережею (Radial Basis Function Network, RBFN) розуміють двошарову мережу без зворотних зв'язків, яка містить прихований шар радіально симетричних нейронів.

Спрощення роботи і навчання досягається завдяки введенню замість прихованого шару нейронів шару RBFN 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) RBFN комірки;

σ_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

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

RBFN осередки 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 RBFN комірки.

Вихідний шар RBFN -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 нейронних мереж, а й новачкам у галузі нейромережевих обчислень.

На рис. 2.9 наведено розроблену схему комбінацій експериментальних методів дослідження з подальшим нейромережовим моделюванням.



Рисунок 2.9 - Узагальнена методика реалізації моделювання анаеробних процесів

Для формулювання прогностичних висновків було зібрано набір експериментальних даних процесів анаеробного зброджування з попередньою ультразвуковою підготовкою та електроферментацією. За допомогою використовуваного математичного апарату в нейронних мережах 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.

З РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ БІОХІМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ФОСФОГІПСУ РАЗОМ З ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ З ВИРОБНИЦТВОМ БІОПАЛИВА

В межах НДР було розроблено спосіб біохімічної переробки відходів у корисні продукти з виробництвом біопалива, що підтверджено патентом України (№149860), а також актом впровадженням на виробництві (Додаток А).

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

Найсуттєвішим результатом при порівнянні динаміки виходу біогазу в процесі електролізної обробки та без обробки є визначення позитивного ефекту електролізної обробки на кількісні показники біогенного газоутворення. Зокрема, на гідролітичній стадії на 6 добу 8,3% у біореакторі-електролізері була частка метану в біогазі, а на 8 добу вона зросла до 15,3%, за стандартних умов на 8 добу % метану в біогазі не перевищувала 0,6%. Слід зазначити, що на метаногенній стадії за стандартних умов збільшився вихід метану в біогазі до 68,7%, а при електролізній обробці він не перевищував 53% (рис. 3.1). Але об'єм біогазу, що виходив із біореактора-електролізера, становив на 28 добу 1525 мл із 640,5 мл метану, а за стандартних умов уже на 28 добу вихід біогазу значно впав до 50 мл, з яких 33,4 мл був метан. Таким чином, на 28 добу продукування біогазу в контрольному експерименті практично призупинилося у зв'язку з вичерпанням ресурсів легкодоступних органічних речовин для зброджування [36].

Під час електролізної обробки відбувається лізис накопиченої мікробної біомаси та важкорозчинних органічних сполук, що, припускаємо, могла сприяти збереженню продуктивності біогазової системи [37].

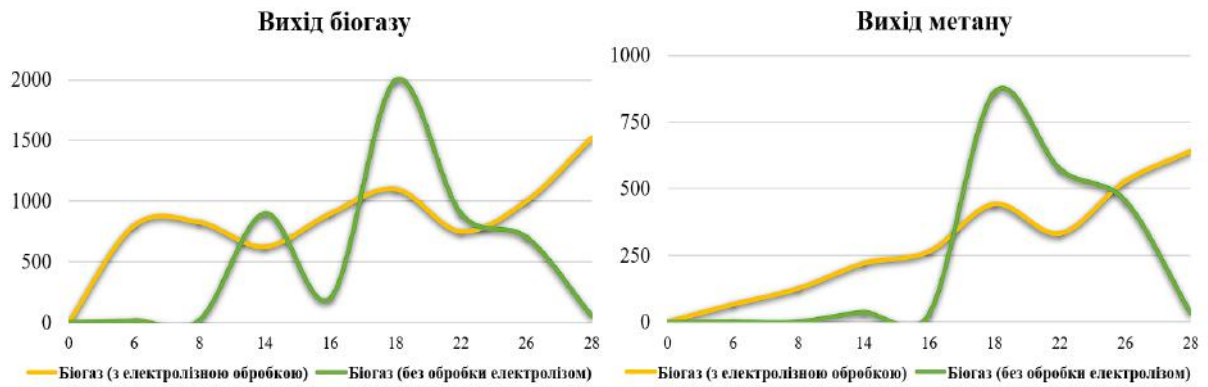


Рисунок 3.1 - Вихід біогазу та метану та вуглекислого газу за стандартних умов та при електролізній обробці

Суттєвим результатом експериментів також є виявлення значного зменшення H_2S у біогазі за впливу електролізу, ніж за стандартних (контрольних) умов анаеробного зброджування. Так, у біореакторі-електролізері спочатку концентрація сірководню становила понад 5000 ppm, як і в контрольних умовах. Але в процесі щоденної електролізної обробки концентрація H_2S знизилася на 14-й день до 487 ppm з подальшим зниженням до 97 ppm на 26 добу. Водночас у контрольних умовах (без електролізної обробки) сірководень у всі періоди анаеробного зброджування перевищував 5000 ppm (рис. 3.2).

На стадії гідролітичної деструкції у факультативно анаеробних умовах збільшується вихід CO_2 , відбулося початкове зміщення в лужний бік рН та подальша стабілізація на 4-6 добу на нейтральному рівні, що було характерно, як і в стандартних умовах, так і під час проведення електролізної обробки під час анаеробної ферментації (рис. 3.3).

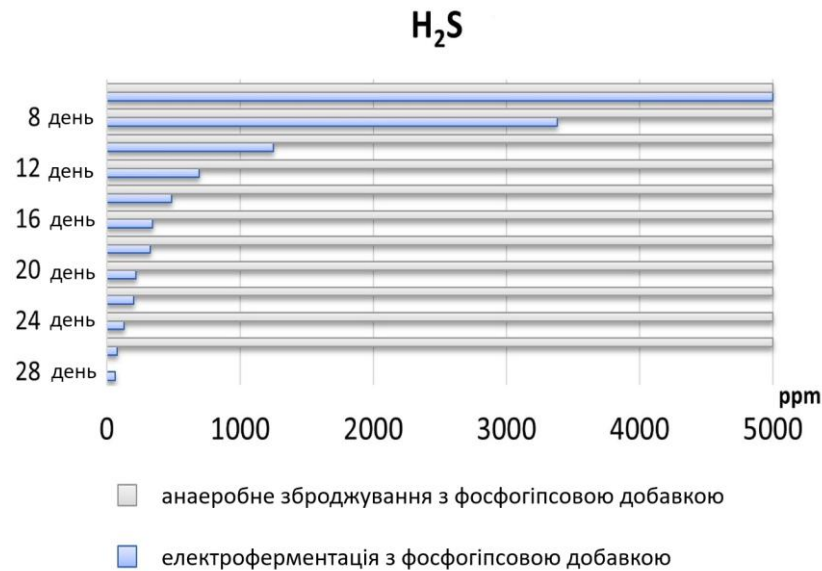


Рисунок 3.2 - Порівняння виходу сірководню в експериментах із застосуванням електричного струму для інтенсифікації виходу біогазу і без обробки

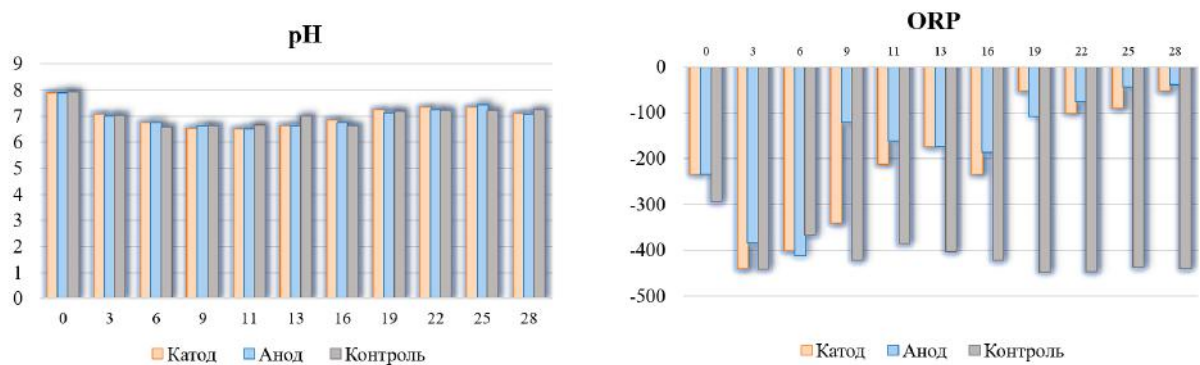


Рисунок 3.3 - Порівняльна характеристика зміни значень рН і ОВП в експериментах з комбінацією біореактора з електролізною обробкою (на катоді й аноді) і без обробки (контроль)

ОВП вимірювали раз на добу до електролізної обробки з двох зон - анодної та катодної. Варто зазначити, що в контрольному експерименті досягалося низьке значення ОВП до -495 мВ, у біореакторі-електролізері, ОВП поступово зростала впродовж усіх етапів зброджування і на 28 добу набула

значення -53 мВ (рис. 9). Імовірно такому збільшенню ОВП сприяла метаболічна активність мікроорганізмів метаногенної асоціації, що також є значним показником під час реалізації електролізної обробки.

У процесі нейромережевого Data Mining контролю було використано ансамблю з 5 НМ за різних початкових налаштувань (3 - РБФ, 2 - багатошаровий перцептрон). Отримана якість результатів моделювання технологічно прийнятна - відносна якість репрезентації даних за всіма нейромережами 52,8% - 93,1% (рис. 3.4).

Інтерфейсне вікно Data Mining моделювання управління з використанням автоматизованих нейронних мереж STATISTICA

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

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 3.4 - Інтерфейсне вікно Data Mining моделювання контролю анаеробної переробки з використанням STATISTICA Automated Neural Networks

Площини візуалізації моделювання анаеробних процесів контролю представлено для НМ на рис. 3.5, що продемонструвала найкращу якість

аналізу, - радіально базисна функція з одним прихованим шаром (включає 5 нейронів).

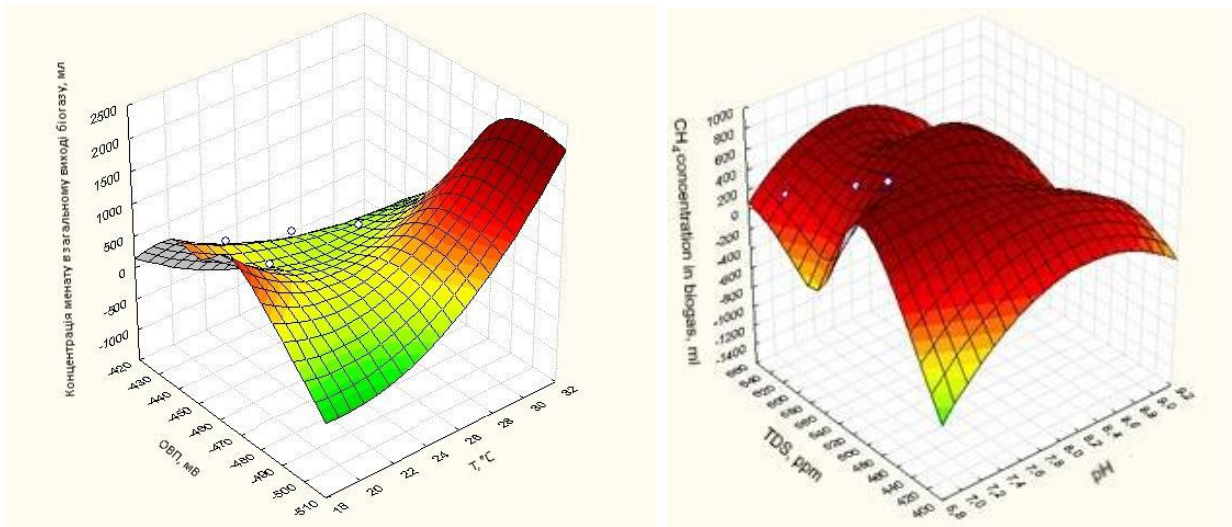


Рисунок 3.5 - Моделювання за допомогою нейронної мережі контрольного варіанта анаеробного зброджування без інтенсифікації процесу виробництва біогазу

У процесі нейромережевого Data Mining електролізної інтенсифікації було використано ансамблю з 5 НМ за різних початкових налаштувань (3 - РБФ, 2 - багат шаровий перцептрон). Отримана якість результатів моделювання технологічно прийнятна - відносна якість репрезентації даних за всіма нейромережами 48,3% - 100%.

Площини візуалізації моделювання електроферментації представлено для НМ на рис. 3.6, яка продемонструвала найкращу якість аналізу, - радіально базисна функція з одним прихованим шаром (включає 6 нейронів).

Таким чином, для візуалізації моделювання анаеробних процесів контролю та електроферментації з додаванням ФГ було використано нейромережу, що мимовільним чином здійснює екстраполяцію за межі даних зібраних експериментально. Синергетичний ефект дії електролізу разом з ФГ продемонстровано в процесі автоматизованого нейромережевого пошуку, що відображено параболічною площиною з піковими значеннями виходу метану

в біогазу при рН = 7.4-7.6 та при підвищенні мінералізованості субстрату досягає прогнозу до 80000 мл метану порівняно зі стандартними умовами до 1000 мл метану на добу. Це звісно екстраполяція на значні об'єми виходу метану, але вона дала змогу змоделювати саме прояв синергії в процесі електроферментації з додаванням ФГ до органічних відходів (рис. 3.7). При цьому коефіцієнти детермінації узгоджувалися з експериментальними даними (0,971).

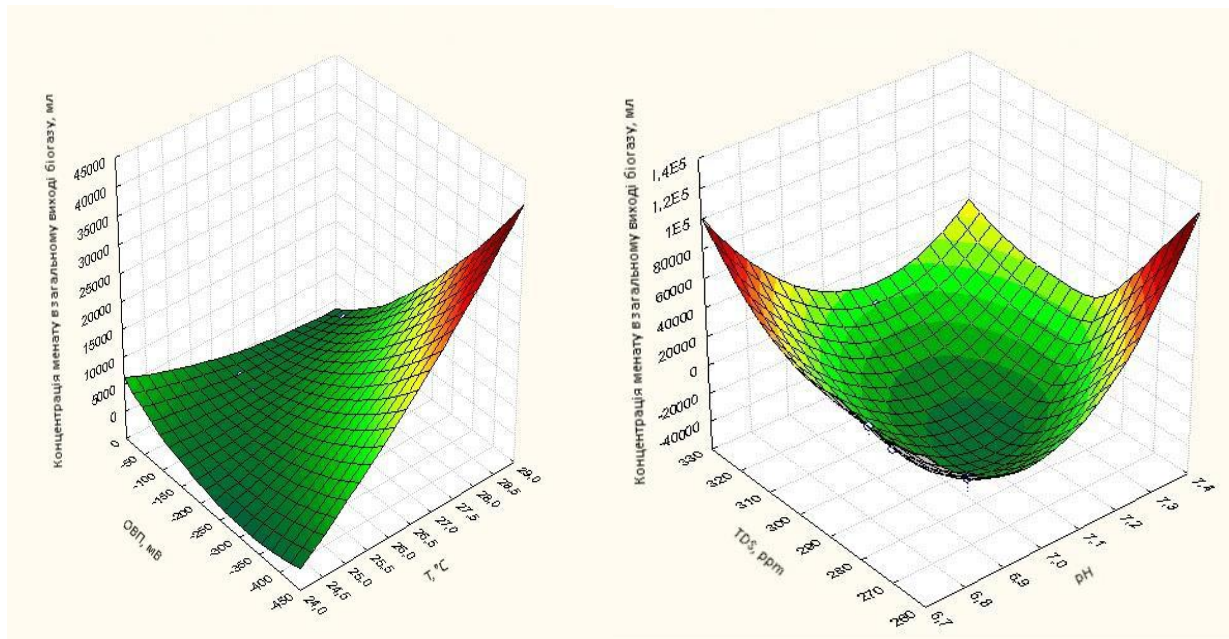


Рисунок 3.6 - Моделювання за допомогою нейронних мереж процесу електроферментації як методу інтенсифікації процесу виробництва біогазу



Рисунок 3.7 - Фактори синергетичної дія ФГ як мінеральної добавки та електролізу в процесі анаеробного зброджування (електроферментації)

Таким чином, розроблена модель на основі нейромережевого автоматизованого пошуку вказує на синергетичний характер впливів методів інтенсифікації виробництва біогазу. Представлені ефекти є не простою сумациєю впливу електролізної обробки та ФГ, а й визначенням саморегуляційних властивостей анаеробної біосистеми під час коливання ОВП та дезінтеграції субстрату та впровадженню додаткових донорів електронів (водню) з трансформацією локацій іонів металів, що у сумі призвело до формування якісних відмінностей від стандартної системи анаеробного зброджування з можливістю вироблення більш високоякісних та екологічно безпечних біопродуктів.

3.2 Дослідження ультразвукої інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом із фосфогіпсом

Ультразвукова обробка ФГ. У таблиці 3.1 наведено значення рН та ОВП до та після ультразвукової обробки ФГ.

Таблиця 3.1 - Зміна параметрів рідкої фази обробленого ФГ

Склад	Об'єм води	Час	pH ₀	ОВП ₀	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

Зміну дислокаційної структури полікристалів ФГ при їх руйнуванні в акустичному полі можна спостерігати на рисунку 3.8. Протягом 6 хвилин обробки змінюється форма кристалів у мінеральній структурі ФГ з утворенням кристалів витягнутої форми у фазі чистого гіпсу. Однак 3 хв обробки, як правило, достатньо для досягнення розміру частинок 10 мкм; в координації з обробкою пташиного посліду це може бути найбільш підходящим періодом ультразвукової обробки ФГ в технологічних розчинах анаеробного зброджування. Більшість попередніх досліджень були зосереджені на застосуванні ультразвукової обробки ФГ в будівельній галузі. Ультразвукова обробка ФГ застосовувалась для покращення властивостей фосфогіпсового в'язучого [38] та гідравлічної модифікації ФГ шляхом додавання цеоліту [39]. Таким чином, цілі ультразвукової обробки є різними, в рамках нашого дослідження важливо розглянути потенціал використання ультразвуку для покращення здатності компонентів ФГ до біопроесів. Крім того, склад ФГ змінюється в залежності від сировини та технологічного процесу виробництва, що також слід враховувати. У випадку Сумської області (Україна) ФГ не містить радіоактивних елементів. Тому його склад є прийнятним для використання в якості добавки при анаеробному зброджуванні органічних відходів, що підтверджено нашими попередніми дослідженнями [40-41].

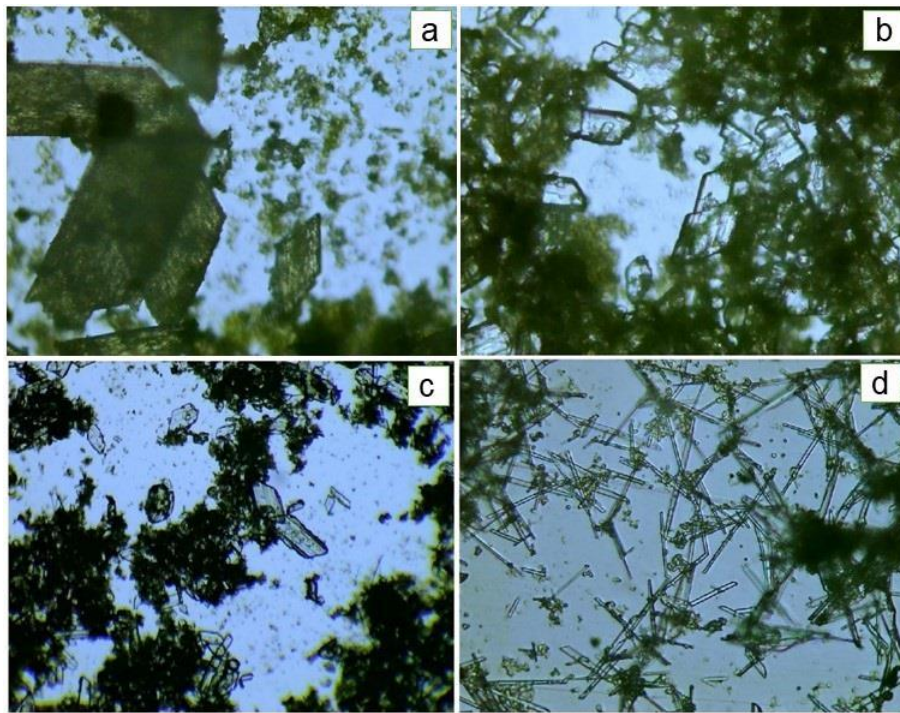
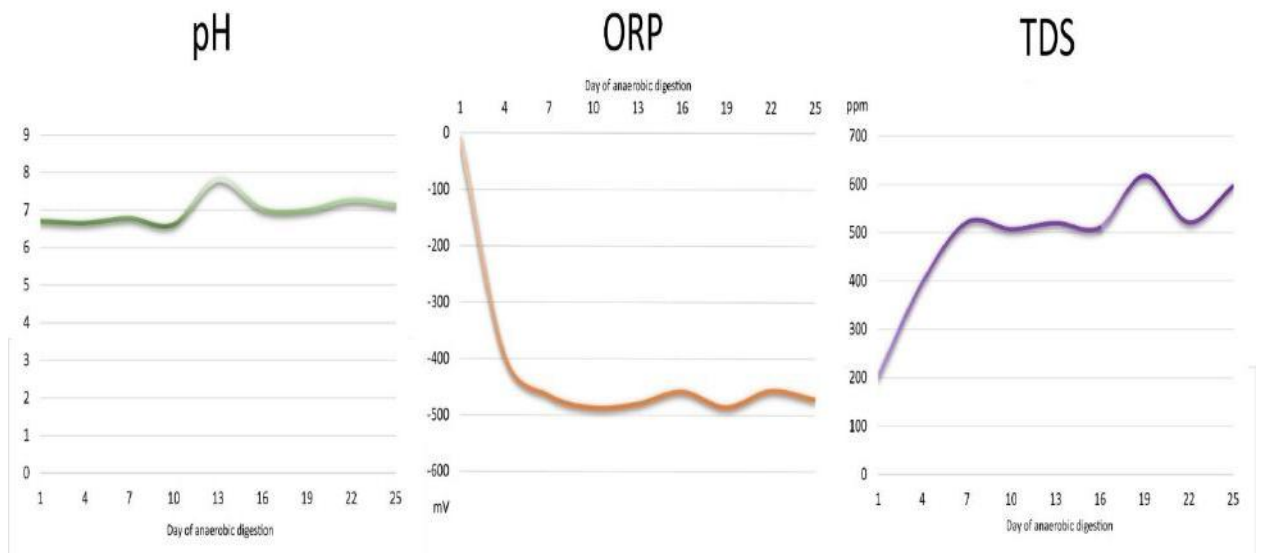


Рисунок 3.8 - Мікрофотографія фосфогіпсу в рідкій фазі, при концентрації 5 грамів на 200 мл водопровідної води, збільшення 40х: а. без обробки 200 мл, збільшення 40х, б. 1 хв. обробка 40х, с. 3 хв. обробка 40х, d. 6 хв. обробка 40х, збільшення 40х.

Як видно з графіку (рис. 3.9) ОВП в біосистемі анаеробного реактора знижується на 5 добу збродження до значень $-400(-500)$ мВ, що свідчить про досягнення стійкого анаеробіозу. Такі стабільні значення ОВП надають можливість стійкого розвитку метаногенезу. Слід зауважити, що значення рН на 6-7 добу досягли 7,6-7,8 (рис. 3.9), що свідчить про швидкий розвиток гідролітичної стадії анаеробного збродження з розщепленням органічних сполук до більш простих та виходом діоксиду карбону й водню. В подальшому відбувається стабілізація значень рН в діапазоні (7,0-7,3), що є оптимальним для розвитку метаногенної асоціації мікроорганізмів та узгоджується із дослідженням [42, 43]. Мінералізованість субстрату також змінюється при початкових значень 201-205 ppm поступово зростає до рівня 550-560 ppm, що свідчить про глибокий рівень мінералізації в анаеробних умовах.



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

Співставлення біосистем анаеробного збродження з попередньою обробкою субстрату ультразвуком за продуктивністю біогазу з контролем (без попередньою обробки) показав збільшення об'єму в 1,3 рази, та досягнення значень 9800 мл загалом та 4980 мл метану на 25 добу (рис. 3.10). Отримані результати узгоджуються з попередніми роботи за різними субстратами [44-48]. Ультразвук впливає на структуру субстрату, розмір його часток та гомогенізацію. Це стимулює більш ефективне впровадження субстратів в метаболічні перетворення анаеробними мікроорганізмами за етапами гідролізу-ацидогенезі-ацетатогенезу-метаногенезу. Ультразвук прискорює вивільнення білка з органічних залишків, особливо після зменшення розміру часточок, а попереднє подрібнення позитивно впливає на вивільнення полісахаридів в робочий об'єм [49].

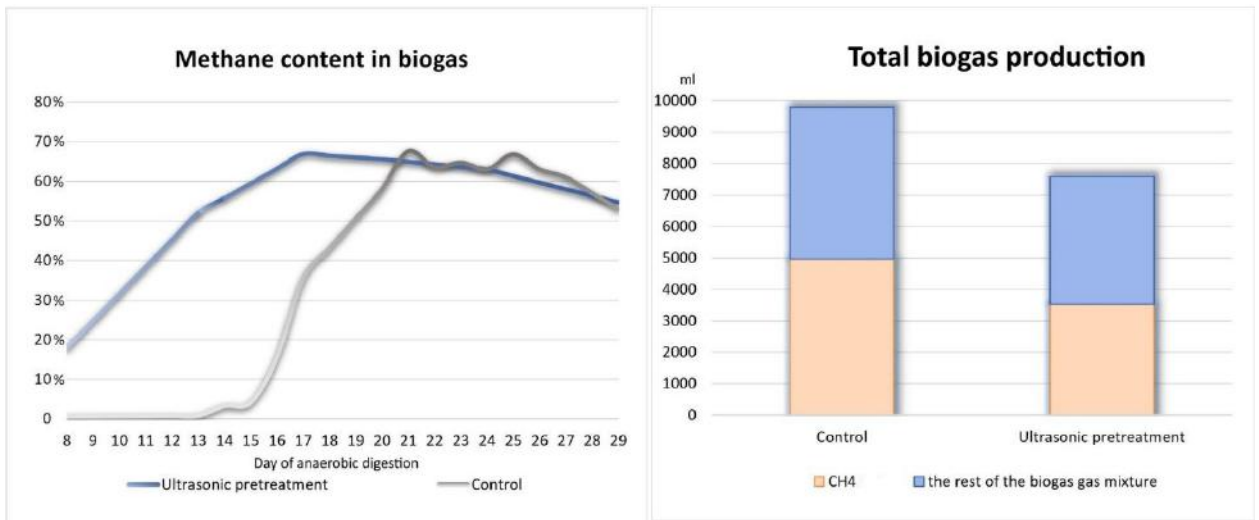


Рисунок 3.10 – Порівняння об'ємних часток компонентного складу біогазу в серії експериментів з попередньою обробкою субстрату та без обробки

Отже наші дослідження узгоджуються з попередніми роботами, згідно яких ультразвукова обробка субстрату збільшує вихід біогазу орієнтовно в 1,4-1,7 разів [50].

У процесі нейромережевого Data Mining ультразвукової інтенсифікації було використано ансамблю з 5 НМ за різних початкових налаштувань (3 - РБФ, 2 - багатошаровий перцептрон). Отримана якість результатів моделювання технологічно прийнятна - відносна якість репрезентації даних за всіма нейромережами 78,2% - 97,5% (рис. 3.11).

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

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

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

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

Площини візуалізації моделювання анаеробних процесів контролю представлено для НМ на рис. 3.12, яка продемонструвала найкращу якість аналізу, - багатошаровий перцептрон з одним прихованим шаром (включає 5 нейронів).

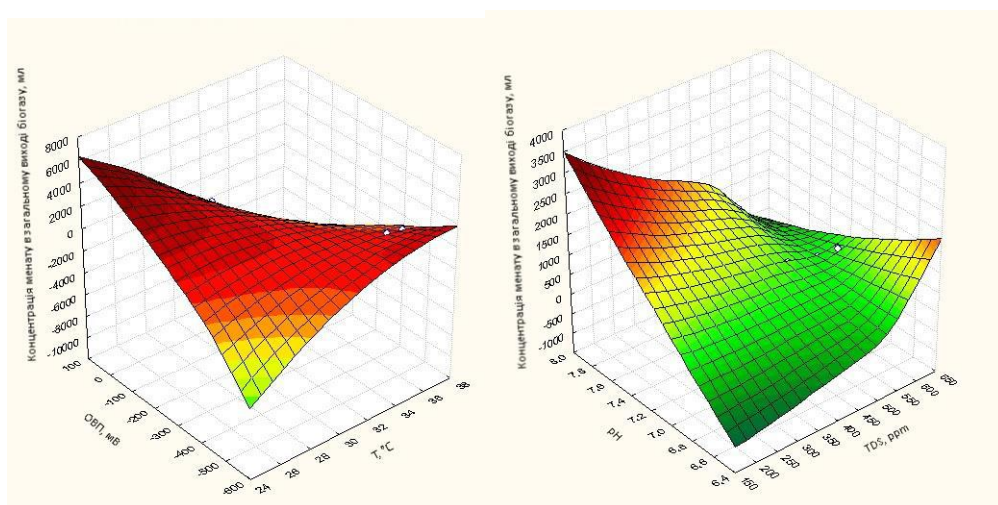


Рисунок 3.12 – Нейромоделювання інтенсифікації анаеробного зброджування за допомогою попередньої ультразвукової обробки субстрату, де Input:

Таким чином, з отриманої нейромережевої реалізації Data Mining процесу інтенсифікації анаеробного зброджування за допомогою ультразвукової попередньої обробки можна зробити кілька висновків. Так, ультразвукова обробка пташиного посліду та розчину ФГ має переконливі аргументи для покращення виробництва біогазу, оскільки модифікує фізико-хімічні властивості вихідного розчину для зброджування. Частково це відбувається за рахунок зміни параметрів рН, ОВП та TDS, але найбільше за рахунок зміни структури субстрату, що забезпечує вищу біодоступність субстратів та домішок, які вивільняються в рідку фазу розчину. Обрані фактори інтенсивності ультразвукової кавітації призводять до зміни в'язкості, швидкості дифузії розчинених газових компонентів у рідині, тиску пари з подальшим впливом на процеси анаеробного зброджування в частині збільшення виходу біогазу.

Так, на рис. 3.13 продемонстровано формалізацію синергетичної дії на основі визначення механізмів підсилювальної дії на газо-рідинну та тверду фазу зброджуваних відходів із підвищенням виходу біогазу та поліпшення біодоступності компонентів мінерального живлення по еколого-трофічних ланках анаеробної системи. Синергетична дія ультразвукової обробки та ФГ 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 підвищення виходу біогазу і метану в ньому.



Рисунок 3.13 – Формалізація синергетичної дії на основі визначення механізмів підсилювальної дії для зброджуваних відходів

3.3 Комплексний аналіз утилізації фосфогіпсу під час анаеробного збродження органічних відходів з використанням методології аналізу життєвого циклу

В рамках цього проекту ми будемо розробляти біотехнологічні рішення для використання та переробки вторинних ресурсів (органічних відходів та ФГ), разом з виробництвом біопалива та інших корисних біопродуктів (рис. 3.14).

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 збродження утворений біогаз забезпечує виробництво «зеленої» енергії та тепла, а завантаження направляється на стабілізацію та зневоднення для подальшого використання

дигістату в якості органо-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.

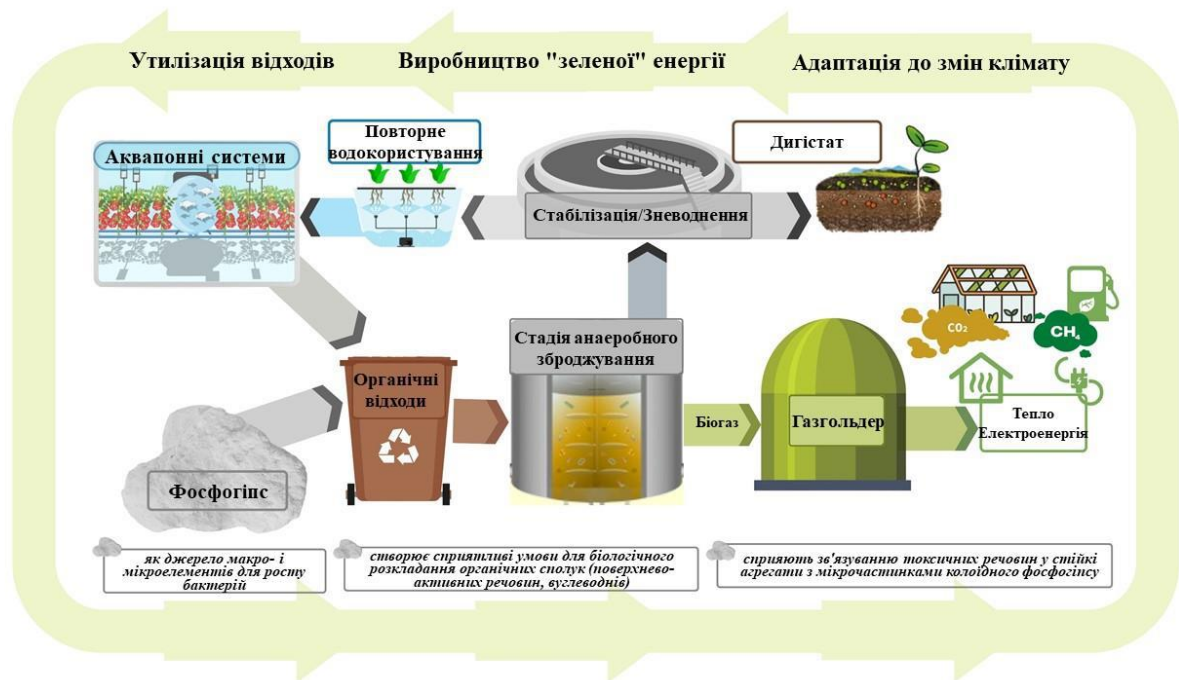


Рисунок 3.14 – Рециклінг фосфогіпсу в біоенергетичних системах

На основі реалізованих теоретичних та експериментальних досліджень було сформовано нові наукові результати. А саме:

1. Визначено та науко-теоретично обґрунтовано механізми трансформації компоненті дигестату разом із добавкою ФГ для отримання екологічно безпечного органо-мінерального добрива.

2. Здійснено обґрунтування процесу інтенсифікації електроферментації органічних відходів під час синергетичної дії ФГ як мінеральної добавки та електролізу на основі визначення механізмів компенсаторної дії на газорідинну та тверду фазу зброджуваних відходів із зв'язуванням токсичних компонентів в біогазі та дигестаті;

3. Здійснено обґрунтування процесу інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів під час синергетичної дії ФГ 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.

Отримані біопродукти можуть бути використані для розвитку зеленої енергетики та агроекології в Україні та Чеській Республіці, що сприятиме просуванню інновацій сталої біоенергетики у виробництві електроенергії та біогазу. Крім того, комплексні біотехнологічні методи переробки відходів дозволять відновити забруднені ґрунти на звалищах та покращити їх буферні властивості.

Розглядаючи оцінку життєвого циклу з використанням комплексної моделі впливу на навколишнє середовище визначаємо три сценарії, які зображені на рис. 3.15, виробництва біогазу та біодобрива (класичний метаногенез (без інтенсифікації); електроферментація та анаеробне збродження з попередньою обробкою ультразвуковою кавітацією) з утилізацією різних комбінацій відходів (пташиний послід + ФГ; рослинні відходи + ФГ). Аналіз невизначеності також був проведений для підтвердження та підвищення достовірності дослідження [51].

За наведеними сценаріями найбільш чутливими індикаторами категорій впливу оцінки життєвого циклу були: зміна клімату, (кг CO₂-екв.), канцерогенність (кг 1,4-ДБ екв.), фотохімічне окислення (кг NMVOC), утворення специфічної речовини (кг PM₁₀ екв.), підкислення ґрунту (кг SO₂-екв), евтрофікація прісних вод (кг P-екв), евтрофікація моря (кг N-екв), екотоксичність (кг 1,4-дБ-екв), виснаження викопних ресурсів (кг нафтового еквіваленту).

Результати показали, що потенційний вплив токсичності для людини, евтрофікації прісних вод, та виснаження викопних копалин має домінуючий внесок у загальний вплив на навколишнє середовище. Споживання електроенергії під час анаеробного зброджування та транспортування сировини на етапі попередньої обробки мали високий потенційний вплив.

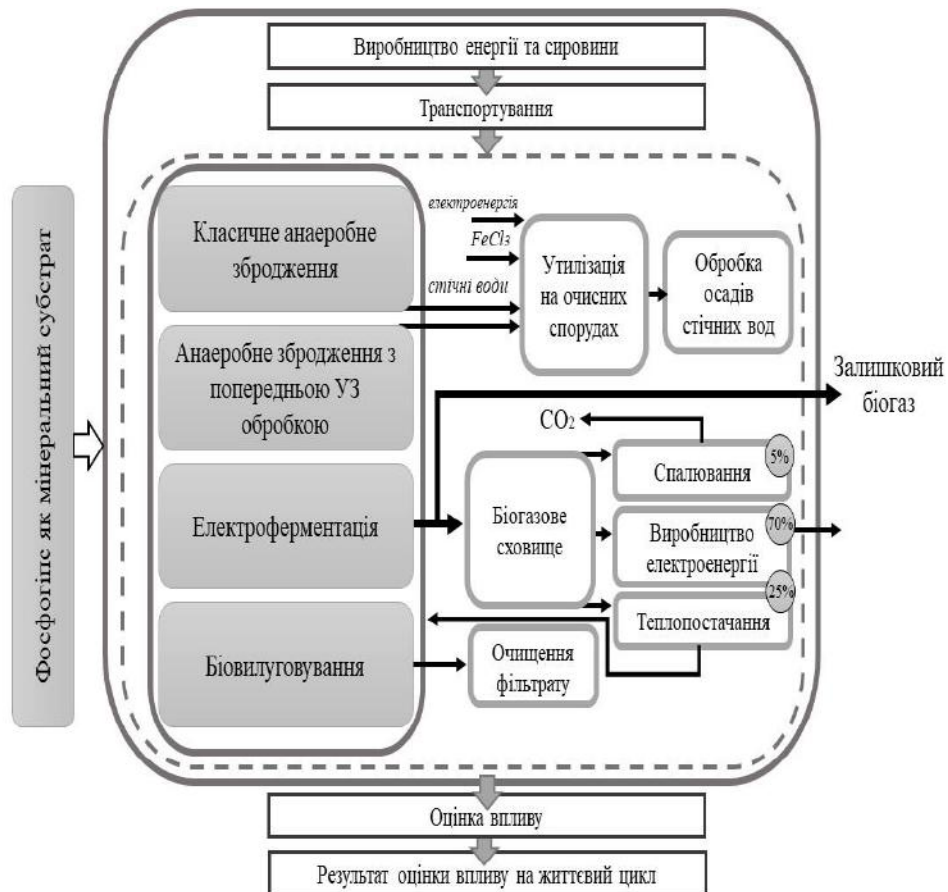


Рисунок 3.15 – Системні кордони оцінки життєвого циклу сумісної переробки органічних відходів разом с ФГ в біогазових технологіях

Сценарій утилізації відходів в електроферментаційних технологіях мав найменший вплив на довкілля, але вимагам підвищених витрат на енергію для проведення електролізу. Збільшення потужностей з виробництва біогазу, підвищення ефективності виробництва електроенергії, оптимізація енергетичної структури України в після воєнний період відновлення та зменшення споживання електроенергії на етапі транспортування та підготовки органічних відходів є ефективними шляхами зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Для цих сценаріїв спільними процесами є утилізація біогазу, прямі викиди в атмосферу (тобто, вуглекислий газ, азот, водень, діоксид сірки, оксиди азоту та сірководень), виробництво та споживання сировини, споживання та рекуперація енергії, транспортування сировини автомобільним транспортом та інфраструктура. Очищення стічних

вод є додатковим процесом для трьох сценаріїв виробництва біогазу та біодобрива, а очищення фільтрату є додатковим процесом для біовилуговування. Отримано пілотні зразки, які будуть використані для доведення промислових зразків до необхідних споживачам властивостей з необхідними показниками газоподібного палива. Практична реалізація цих результатів узгоджується з вимогами циркулярної економіки та цілями сталого розвитку до 2030 року. Так, агропромисловий комплекс України має технічно доступні ресурси органічних відходів та побічної продукції для виробництва біогазу в обсязі 2,6 млрд м³ CH₄/рік.

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.

ВИСНОВКИ

1.1 Здійснено SWOT-аналіз розвитку біогазових установок та покращення поводження з органічними відходами. Проаналізувано дослідження оцінки життєвого циклу поводження із органічними відходами з виділенням різних сценаріїв поводження. Здійснена візуалізація кластерних взаємозв'язків у наукових публікаціях різних галузей використання ФГ та його застосування в промисловості. Прослідковано, що його компонентний склад та ефективне вилучення корисних та зв'язування токсичних компонентів на при переробці ФГ має важливий вплив на процеси валоризації ФГ. У контексті концепції запропонована біохімічна переробка ФГ з використанням біопроцесів та впровадження нових біотехнологічних рішень з переробки фосфорної сировини, що дозволить знизити рівень техногенного тиску на навколишнє середовище.

2.1 Досліджено екологічні властивості відвального ФГ і змінюється та трансформується з часом складування відповідно до розміщення терас. На території відвалу прослідковуються варіації значень елементного складу та рН від 3,34 до 7,35. Досліджено, що ФГ має потенціал використання як мінеральний носій для корисних груп мікроорганізмів у біопроцесах детоксикації компонентів навколишнього середовища.

2.2 Розроблено експериментально-методичний комплекс реалізації процесів утилізації відходів в енергетичних цілях із комбінацією методів проведення еколого-біохімічних досліджень утилізації ФГ в біоенергетичних технологіях переробки органічних відходів, на перетині між блоками досліджень за окремими технологічними рішеннями.

3.1 Проведено моделювання процесу інтенсифікації анаеробного збродження органічних відходів разом з ФГ під час електроферментації. Вихід 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 зброженого

субстрату під впливом електролізу показало зміни в самому процесі агрегації з утворенням осередків скупчень колоній мікроорганізмів з гілками окресленої форми. ОВП під час електроферментації мало флюктууючий 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.

3.2 Досліджено вплив сумісної дії ультразвукової обробки та ФГ добавки на процес анаеробного збродження. Ультразвукова 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 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 ФГ добавки. Застосування ультразвукової попередньої обробки ФГ може розширити застосування ФГ в біопереробці органічних відходів шляхом одержання корисних екологічно-безпечних біопродуктів.

3.3 Запропоновано науково-методичний підхід інтенсифікації процесів анаеробної трансформації за допомогою ФГ в біоенергетичних технологіях, що засновано на біохімічних та фізико-хімічних механізмах стимулювання розвитку окремих еколого-трофічних груп мікроорганізмів. Отримані біопродукти можуть бути використані для розвитку зеленої енергетики та агроекології в Україні та Чеській Республіці. Крім того, комплексні біотехнологічні методи переробки відходів дозволять відновити забруднені ґрунти на звалищах та покращити їх буферні властивості.

3.4 Змодельовано три сценарії виробництва біогазу та біодобрива (класичний метаногенез (без інтенсифікації); електроферментація та анаеробне збродження з попередньою обробкою ультразвуковою кавітацією) з утилізацією різних комбінацій відходів (пташиний послід + ФГ; рослинні відходи + ФГ). Сценарій утилізації відходів в електроферментаційних технологіях мав найменший вплив на довкілля, але вимагам підвищених витрат на енергію для проведення електролізу. Збільшення потужностей з виробництва біогазу, підвищення ефективності виробництва електроенергії, оптимізація енергетичної структури України в після воєнний період відновлення та зменшення споживання електроенергії на етапі транспортування та підготовки органічних відходів є ефективними шляхами зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Був розроблений спосіб біохімічної переробки відходів у корисні продукти з виробництвом біопалива, що підтверджено патентом України (№149860), а також актом впровадженням на виробництві (Додаток А).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гелетуха Г., Кучерук П., Матвеев Ю. Перспективи виробництва біометану в Україні – Аналітична записка UABIO 29 - UABIO. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/09/UA-Position-paper-UABIO-29.pdf>.
2. Біометан в Україні дозволять завантажувати в ГТС після проходження процедури верифікації. Українська Енергетика. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/biometan-v-ukraini-dozvoliat-zavantazhuvat-y-v-hts-pislia-prokhodzhennia-protsedury-veryfikatsii>.
3. 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/wp-content/uploads/2021/06/Dorozhnya-karta-rozvytku-bioenergetyky-v-Ukrayini-do-2050-roku-i-Plan-dij-do-2025.pdf>.
4. Проєкт Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року. Головна – ЕнергоВсесвіт. URL: <https://vse.energy/news/pek-news/1948-npd-ve-30>.
5. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Верховна Рада удосконалила державне регулювання у сфері поводження з пестицидами і агрохімікатами. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/verhovna-rada-udoskonalila-derzhavne-regulyuvannya-u-sferi-povodzhennya-z-pesticidami-i-agrohimikatami>.
6. Управління якістю дигестату - SAF Україна. SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1006/>.
7. Стандартизація якості та сертифікація продуктів з дигестату - SAF Україна. SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1029/>.
8. 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. 372-374.
9. Co-digestion of poultry litter with cellulose-containing substrates collected in the urban ecosystem / Y. Chernysh et al. Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01582-y>.
10. Map of major fertilizer plants in Europe - Fertilizers Europe. Fertilizers Europe. URL: <https://www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/map-of-major-fertilizer-plants-in-europe/>.

11. Поживне середовище: 15 найбільших українських виробників мінеральних добрив. LANDLORD. URL: <https://landlord.ua/reytingi/pozhivne-seredovishhe-15-naybilshih-ukrayinskih-virobnikiv-mineralnih-dobriv/>.

12. Онлайн-семинар "Можливості використання дигестату біогазових установок як добрив": підсумки та матеріали - SAF Україна. SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1069/>.

13. Дигестат як добриво – зміни до закону "Про пестициди та агрохімікати" - UABIO. URL: <https://uabio.org/news/uabio-news/11230/>.

14. Koszel M., Lorencowicz E. Agricultural Use of Biogas Digestate as a Replacement Fertilizers. Agriculture and Agricultural Science <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1> Procedia. 2015. Vol. 7. P. 119–124. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.004>.

15. Tunable active sites on biogas digestate derived biochar for sulfanilamide degradation by peroxymonosulfate activation / Y. Wang et al. Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 421. P. 126794. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126794>.

16. Application of biochar of different genesis: applied aspects of activation / Y. Chernysh et al. ISB-INMA ТЕН' 2022 International Symposium. Agricultural and mechanical engineering, Bucharest, 6-8 October 2022. с. 22-31.

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

18. Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Tabatabaei, M. (). Waste Management Strategies: Life Cycle Assessment (LCA) Approach. In: Tabatabaei, M., Ghanavati, H. (eds) Biogas. Biofuel and Biorefinery Technologies. 2018. Vol 6. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3_12

19. Muralikrishna, I., Manickam, V. Life Cycle Assessment. In Environmental Management. Elsevier. 2017. pp. 57–75. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>

20. Life Cycle Assessment of organic waste management strategies: an Italian case study / C. Buratti et al. Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 89. P. 125–136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.012>.

21. Jensen M. B., Møller J., Scheutz C. Comparison of the organic waste management systems in the Danish–German border region using life cycle assessment (LCA). Waste Management. 2016. Vol. 49. P. 491–504. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.035> (

22. Economic and environmental life cycle assessment of organic waste treatment by means of incineration and biogasification/ F. Mayer et al. Science of

The Total Environment. 2020. Vol. 721. P. 137731. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137731>.

23. Mayer F., Bhandari R., Gäth S. A. Life cycle assessment on the treatment of organic waste streams by anaerobic digestion, hydrothermal carbonization and incineration. *Waste Management*. 2021. Vol. 130. P. 93–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.019>

24. Escamilla-Alvarado C., Poggi-Varaldo H. M., Ponce-Noyola M. T. Bioenergy and bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: a comparative life cycle assessment with prospective application to Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 24, no. 33. P. 25602–25617. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6939-z>

25. Fuchsz M., Kohlheb N. Comparison of the environmental effects of manure- and crop-based agricultural biogas plants using life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 86. P. 60–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.058>

26. Phosphogypsum and its potential use in Croatia: challenges and opportunities / T. Bituh et al. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2021. Vol. 72, no. 3. P. 93–100. URL: <https://doi.org/10.2478/aiht-2021-72-3504>.

27. 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>.

28. Closing the upcoming EU gypsum gap with phosphogypsum / N. Haneklaus et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. Vol. 182. P. 106328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106328>.

29. Chernysh Y. Y. Environmental biotechnologies for phosphogypsum recycling: protection of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere. Sumy: Sumy State University, 2021. P. 178.

30. Chernysh Y. Recycling of radioactive phosphogypsum wastes. *Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Fernando Pacheco-Torgal Joseph O. Falkinham Jerzy Andrzej Gałaj. 2022. P.225-240.

31. Plishko A.A., Majstrenko M.I. Protection of agricultural lands from pollution. [Ohorona silskogospodarskih ugid vid zabrudnennya]. 1985. Kyiv: Urozhaj, 160 p.

32. Biodegradability and toxicity assessment of a real textile wastewater effluent treated by an optimized electrocoagulation process / D. R. Manenti et al. *Environmental Technology*. 2014. Vol. 36, no. 4. P. 496–506. URL: <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.952676>.

33. Enhancing the anaerobic digestion of papermaking black liquor with three-dimensional iron-carbon electrolysis and assessment of microbial community changes / X. Zheng et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. P. 108115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108115>.

34. 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.

35. Сучасні наукові аспекти прикладної механіки: Навчальний посібник / С. В. Ковалевський [та ін.]. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 114 с

36. 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. P. 6826. URL: <https://doi.org/10.3390/su14116826>.

37. 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>.

38. Effects of waste fluid catalytic cracking on the properties of semi-hydrate phosphogypsum / D. Nizevičienė et al. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 137. P. 150–156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.037>.

39. The treatment of phosphogypsum with zeolite to use it in binding material / D. Nizevičienė et al. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 180. P. 134–142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.208>.

40. Effect of Phosphogypsum Addition on Methane Yield in Biogas and Digestate Properties During Anaerobic Digestion / V. Chubur et al. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. Vol. 9, no. 1. P. H11–H18. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).h2](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).h2) (date of access: 13.12.2022).

41. Ecological properties of phosphogypsum and its products: biogeosystem technique for management / Y. Chernysh et al. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 23 – 25 листопада 2022 р. с. 97–102.

42. Synergetic effects of biochar addition on mesophilic and high total solids anaerobic digestion of chicken manure / S. Kizito et al. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 315. P. 115192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115192>.

43. Evaluation of Biogas Production from Bio-Digestion of Organic Wastes / O. J. Odejobi et al. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2020. Vol. 51. P. 217–227. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.51.217>.

44. Ultrasound and microwave pretreatments promote methane production potential and energy conversion during anaerobic digestion of lipid and food wastes / L. Yue et al. *Energy*. 2021. Vol. 228. P. 120525. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120525>.

45. Ramanathan RM N., N B., K C. Biogas from confectionery wastewater with the application of ultrasound pre-treatment. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1649747>.

46. Romio C., Kofoed M. V. W., Møller H. B. Effect of ultrasonic and electrokinetic post-treatments on methane yield and viscosity of agricultural digestate. *Bioresource Technology*. 2022. P. 127388. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127388>.

47. Експериментальне дослідження анаеробного збродження пташиного посліду з інокулятом активного мулу. / Чубур В. [та ін.]. Сталій розвиток – стан та перспективи. III міжнародний науковий симпозиум: Збірник матеріалів, Львів – Славське – Київ, 26-29 січня 2022, С.62-65.

48. Переробка пташиного посліду в енергетичних цілях в технологіях захисту довкілля / Чубур В. [та ін.]. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2022. Випуск 3(13). С. 86–92. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.13>.

49. Effects of combined ultrasonic and grinding pre-treatments on anaerobic digestion of vinegar residue: organic solubilization, hydrolysis, and CH₄ production / X. Kong et al. *Environmental Technology*. 2020. P. 1–28. URL: <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1870572>.

50. Ковальов А.А, Ковальов Д.А, Григорьев В.С. Енергетична ефективність попередньої обробки синтетичного субстрату метантенка в апараті вихрового шару. Наукова стаття, 2020. С. 97 – 98.

51. Огляд можливостей утилізації фосфогіпсу під час анаеробного збродження органічних відходів з використанням методології аналізу життєвого циклу / Черниш Є. Ю. [та ін.]. «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»: Матеріали Міжнародної конференції. м. Дніпро, 29 листопада 2022 р. С. 241-242

ДОДАТКИ

Додаток А

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 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 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 (курячого посліду та фосфогіпсу) на засадах еколого-синергетичного підходу. Підтверджена повна екологічна безпека одержаного товарного продукту.

3. Результати будуть застосовані для рекомендацій утилізації фосфогіпсу в процесі сумісного анаеробного збродження для виробництва органо-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

Додаток Б

Запрошення



**Faculty of Tropical
AgriSciences**

Czech University of Life Sciences Prague,
Kamýčká 129, 165 00 Praha-Suchbát
Tel.: +420 224 382 508
e-mail: roubik@ftz.czu.cz, www.ftz.czu.cz

In Prague, 28. 11. 2022

INVITATION LETTER

Hereby, I invite Yelizaveta Chernysh (Passport No. FE333937) to visit the **Faculty of Tropical AgriSciences, Czech University of Life Sciences Prague (CZU)** from 6th December 2022 to 13th December 2022.

The visit is realized as a short-time mobility within the implementation of the joint Ukrainian-Czech R&D project (2021–2022) “Bioenergy innovations in waste recycling and rational use of natural resources” (*Registration number of R&D: 0121U113753*). The visit is dedicated to the discussion of the last year of the project implementation and development of the dissemination strategy.

The visit should include:

- Meetings with scientists from CZU with discussion about scientific cooperation;
- Establishment of further cooperation with experts outside the CZU;
- Discussion about future steps regarding joint research;
- Discussions about the possibility of increasing students and scientific staff exchange.

We hope that your visit will strongly help to reinforce our scientific cooperation and will be the base for future common work between Czech University of Life Sciences in Prague and Sumy State University.

Czech University of Life Sciences Prague will cover travel and accommodation expenses.

Best regards



FACULTY OF TROPICAL AGRISCIENCES
 International Office
 Kamýčká 129, 165 00 Praha-Suchbát
 Czech Republic
 tel.: +420 224 382 496

Associate Professor Dr. Hynek Roubik
Biogas Research Team – Group leader
Department of Sustainable Technologies
Faculty of Tropical AgriSciences
Czech University of Life Sciences Prague

Звіт про використання коштів, виданих на відрядження або під звіт № _____

Найменування податкового агента: **Сумський державний університет**
 Код за ЄДРПОУ: **0 5 4 0 8 2 8 9**

Відділ: **ЕІІ** Посада: **доцент**
 Кафедра: **Відділ заг. викон. год. МЧН-2012** Професія:
 П. І. Б.: **Сергієм Віталієм Кривіна**
 Податковий номер (або серія і номер паспорта): _____

Звіт затверджено в сумі _____ (прописом)
 Ректор (інша уповноважена особа) _____ (прописом)
 " " _____ 20__ року
 Звіт перевірено _____ грн
 " " _____ 20__ року
 Бухгалтер _____

Призначення авансу

	Сума (грн, коп.)
Залишок попереднього авансу	—
Перевитрата	
Одержано (від кого, N та дата)	
1	
2	
3	
Всього отримано	15497,64
Витрачено	
Залишок	
Перевитрата	
Додаток _____ документів	

Дебет	Кредит	Сума (грн, коп.)

Залишок унесений _____ у сумі _____ грн за _____ касовим ордером № _____ від _____ 20__ року
 Перевитрата видана _____ платіж дорученням _____
 " " _____ 20__ року Підпис _____ Перелік документів наведено на звороті.

При поверненні суми надміру витрачених коштів протягом звітного місяця, на який припадає граничний термін повернення:
 Сума податку _____ (грн, коп.) = не повернута сума** _____ (грн, коп.) x ставка податку*** : 100
 Підпис особи, яка склала розрахунок _____ Дата складання розрахунку _____ 20__ року

3 розрахунком ознайомлений: підпис _____ (прізвище, ім'я, по батькові) _____ Дата _____

* Серія та номер паспорта для фізичних осіб, які через свої релігійні переконання відмовились від прийняття реєстраційного номера облікової картки платника податків та повідомили про це відповідний контролюючий орган і мають відмітку у паспорті.
 ** Сума розраховується з урахуванням пункту 164.5 статті 164 розділу IV Податкового кодексу України.

№ з/п	Дата документа	Кому, за що і на підставі якого документа заплачено	Сума (грн, коп.)	Дебет рахунку
1	6.12-13.12	роботи	15497,64	
2				
3				
		Всього	15497,64	

Використання службового автотранспорту _____

Звіт про результати службового відрядження
 Завдання виконано в повному обсязі

Підзвітна особа _____ підпис _____

Керівник структурного підрозділу або вища посадова особа _____ Підпис _____ П.І.П. _____

14 грудня 20**22** року

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор СумДУ

Василь КАРПУША

"14" 12 2022 р.

ФАКТИЧНИЙ КОШТОРИС

витрат на відрядження для виконання завдань договору М/41-2022

відповідального виконавця договору, доцента кафедри екології та природозахисних технологій Черниш
Слізавети Юрїївни

до м. Прага (Чехія)

(з 06.12.2022 по 13.12.2022)

	витрат \$	Кількість днів	Євро	\$	грн.
Всього витрат					<u>15 797,64</u>
Добові, Чехія		8		54,00	15797,64

Курс USD, встановлений НБУ на 14.12.2022 36,5686

Проректор з наукової роботи

Анатолій ЧОРНОУС

Головний бухгалтер

Ніна БАРИКІНА

М.н.с. НДЧ

Лариса СТЕПКО

Додаток В



Joint Program for Virtual Mobility
«Sustainable Biotechnology and Environmental Protection»

between Sumy State University, Ukraine, and
 Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic

This program will be delivered virtually and is aimed at improving the quality of education, and meaningful exchange between teachers and students at universities of different language cultures in geographically remote regions.

The target audience for this program is bachelor's, master's, and doctoral students.

The period of the program delivery is September 27, 2022 – November 15, 2022.

Lecturer:

Assoc. Prof. Dr. Hynek Roubik, Faculty of Tropical AgriSciences, Czech University of Life Sciences Prague

Assoc. Prof. Dr. Yelizaveta Chernysh, Department of Ecology and Environmental Protection Technology, Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies, Sumy State University

Joint program learning components

Sustainable Biotechnology and Environmental Protection subject aims to provide a view into the application of processes for the protection and restoration of the quality of the environment, highlighting the importance of sustainable biotechnology in attaining a safe and sustainable environment.

Aiming to cover especially the four basic strategies of environmental protection (minimizing the amount of waste generated; reducing the toxicity of the wastes; finding more satisfactory ways of disposing of wastes, and biotechnological solutions targeting the reconsideration of waste as a resource for valuable raw materials is of interest). The effect of policy and regulations on biotechnology will also be tackled together with closing the loop via bioeconomy approaches.

No.	Topics	Academic hours (lectures and seminars)
1	Biotechnologies in human life	2
2	Bioindication and environmental biotesting	4
3	Anaerobic waste treatment processes	2
4	Biological methods to remove emerging contaminations from the environment	2



5	Biotechnologies in agriculture and allied industries	4
6	Bioeconomy	2
7	Overview of biogas potential in the world	4
8	Bioenergy processes of organic waste recycling and phosphogypsum utilization	2
9	Low-rank coal bio-utilization	2
10	Intensification of anaerobic digestion of wastewater and sewage sludge: trends analysis	4
11	Modelling of biofuel production in climate change adaptation technologies	2
12	Restoration of bioproductivity of radiation-contaminated soils	2
TOTAL		32

Teaching and learning activities

Activities	Academic hours
Project	60 h
Self-preparation	54 h
Consultation	2 h
Examination, Credit	2 h
Lectures	16 h
Seminars	16 h
Total	150 h

There are two options to pass mobility:

- (i) *Credit for completing the full course.* The volume of academic discipline is 5 credits ECTS, 32 hours of contact work with the teacher (16 hours of lectures, 16 hours of practical exercises), 2 hours of consultation, 2 hours of examination, and 114 hours of independent work (self-preparation and project preparation).
- (ii) *Lecture attendee.* The volume of academic discipline is 1 credit ECTS and 16 hours of lectures.



Intended learning outcomes: At the end of the course, participants will be able (1) to identify major trends in the biotechnological application for strategies of environmental protection, as well as (2) to rise to the current challenge in the field.

Assessment: End-of-course test (100 points).

The total duration of the program is 150 academic hours or 5 credit ECTS.

Criteria for successful joint program completion and certification requirements:

- (i) The certificate of completion for 150 hours (5 ECTS) will be issued to those participants who have completed the learning component. A digital version of the certificate will be emailed to the participants.
- (ii) The certificate of attendance at the lecture course for 16 hours (1 ECTS) will be issued to those participants who have completed the learning component. A digital version of the certificate will be emailed to the participants.

Acknowledgments: This academic mobility program will be held as part of the planned activities of the dissemination of the results of the joint Ukrainian-Czech R&D project (2021–2022) “Bioenergy innovations in waste recycling and rational use of natural resources” (*Registration number of R&D: 0121U113753*).

Coordinator from Sumy State University:
Professor Leonid Plyatsuk, DSc.
 Head of Department of Ecology
 and Environmental Protection Technologies,
 Faculty of Technical Systems and Energy Efficient
 Technologies,
 Sumy State University, Sumy, Ukraine

(Signed and stamped)

Coordinator from Czech University of Life Sciences Prague:
Associate Professor Dr. Hynek Roubik
 Biogas Research Team - group leader
 Faculty of Tropical AgriSciences
 Czech University of Life Sciences Prague

(Signed and stamped)