

НУБІП України

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

НУБІП України

06.07. – МР. 216 «С». 2022.04.21. 17 ПЗ

ПОМАРЧУК АДРІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ

НУБІП України

2023

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології
УДК 606:620.925

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету
захисту рослин, біотехнологій та
екології
Коломієць Ю.В.
«__» _____ 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувача кафедри
екобіотехнології та біорізноманіття
Кваско О.Ю.
«__» _____ 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Біотехнології одержання органічних добрив з відходів біогазового виробництва»

Спеціальність 162 «Біотехнологія та біоінженерія»
(код і назва)

Освітня програма «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми
д. с.-г. наук, професор
(науковий ступінь та вчене звання)

Лісовий М.М.
(підпис) (ГБ)

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи
д. с.-г. наук, професор
(науковий ступінь та вчене звання)

Лісовий М.М.
(підпис) (ГБ)

Виконав
(підпис)

Пономарчук А.В.
(ГБ студента)

КИЇВ-2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

“ ” 2023 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ

Піномарчук Андрій Віталійович
(прізвище ім'я по батькові)

Спеціальність 162 «Біотехнологія та біоінженерія»

(код і назва)

Освітня програма «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Біотехнології одержання органічних добрив з відходів біогазового виробництва»

Затверджена наказом ректора НУБіП України від 15.02.2023 р. №216 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 1 листопада 2023 р.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи субстрат, біогазова установка

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Дослідити та обрати сировину для одержання добрива.
2. Дослідження методів отримання органічних добрив.
3. Розробка параметрів для отримання якісного добрива з відходів біогазової установки

Перелік графічного матеріалу:

Дата видачі завдання 1 вересня 2022 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

НУБІП України

Бакалаврська робота на тему «Біотехнології одержання органічних добрив з відходів біогазового виробництва» виконана на 53 сторінках тексту, використано 33 джерела.

НУБІП України

Робота складається з таких розділів: зміст, вступ, огляд літератури, об'єкту та методів дослідження, результатів дослідження, висновків та списку використаних джерел.

Метою було вивчити можливості отримання органічних добрив з відходів біогазового виробництва.

Завдання роботи:

НУБІП України

– Дослідити та вибрати найбільше підходящу сировину для отримання органічного добрива.

– Дослідити методи отримання органічного добрива.

– Розробити параметри для отримання якісного добрива з відходів біогазової установки.

НУБІП України

Предметом дослідження було гранульоване органічне добриво.

Методами дослідження були анаеробне зброджування, перетворення

дигестату в гранульоване добриво

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
1.1 Біогазове виробництво та його роль у вирішенні екологічних проблем.....	9
1.2 Що таке біодобриво.....	10
1.3 Потенціал органічних відходів.....	11
1.4 Органо-мінеральні залишки після отримання біогазу з відходів як комбіновані складні добрива для сільського господарства.	14
1.5. Економічний потенціал перетворення біовідходів на добриво	16
1.6. Вплив добрив і біодобрив на навколишнє середовище.....	18
1.7. Біодобриво в сільськогосподарській практиці.....	20
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	23
2.1 Отримання біогазу	23
2.2 Сучасні біотехнології у виробництві органічних добрив.....	27
2.3 Виробництво органічних добрив із відходів біогазового виробництва	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	35
3.1. Фактори, що визначають виробництво гранульованого добрива.	35
3.2. Правомірність переробки дигестату в гранули добрив для біогазових установок потужністю 1 МВт.....	47
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

НУБІП України

НУБІП України

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НУБІП України

ВРХ- велика рогата худоба

VS- нормальні кубічні метри на тону легких твердих речовин

TS- суха речовина

RSME- середньоквадратична помилка

ЛОС- легкі органічні сполуки

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

Актуальність. Проблема ефективної переробки та утилізації відходів є однією з найгостріших у світі. За останні роки значно зросла увага до питань раціонального поводження з сільськогосподарськими відходами в Україні як з боку влади, так і з боку наукової спільноти. Вирішення проблеми можливо шляхом здійснення ефективних заходів для швидкої, безпечної переробки відходів та отримання позитивного економічного та екологічного ефекту від утилізації та повторного використання сировини.

Використання органічних добрив з відходів виробництва біогазу є важливим питанням у контексті сталого управління відходами та сільського господарства.

Виробництво органічних добрив з відходів виробництва біогазу може допомогти зменшити відходи та викиди парникових газів, що важливо для збереження навколишнього середовища.

Використання органічних добрив із відходів виробництва біогазу може створити додатковий потік прибутку для біогазових компаній, допомагаючи підтримувати родючість ґрунту та підвищувати врожайність.

Проте використання органічних добрив із відходів виробництва біогазу має й недоліки, такі як високі витрати на транспортування та зберігання, необхідність додаткової переробки та очищення відходів, дотримання певних умов зберігання та використання.

Результати дипломної роботи будуть сприяти розвитку нових знань і технологій у цій галузі, які можуть мати практичне застосування в галузі та принести користь суспільству в цілому.

Таким чином, дипломна робота з біотехнології отримання органічних добрив з відходів виробництва біогазу є дуже актуальною через її потенціал для вирішення важливих екологічних та економічних проблем та сприяння розвитку сталого поводження з відходами та ведення сільського господарства.

Мета: вивчити можливості отримання органічних добрив з відходів біогазового виробництва.

Завдання.

– Дослідити та вибрати найбільше підходящу сировину для отримання органічного добрива.

– Дослідити методи отримання органічного добрива.

– Розробити параметри для отримання якісного добрива з відходів біогазової установки.

Об'єкт дослідження: отримання органічних добрив з відходів біогазового виробництва.

Предмет дослідження: гранульоване органічне добриво.

Методи дослідження: анаеробне зброджування, перетворення дигестату в гранульоване добриво.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Біогазове виробництво та його роль у вирішенні екологічних проблем

Біогаз, що традиційно використовується для приготування їжі та опалення, згодом еволюціонував. Сучасні технології збільшили доступність біогазу для інших дешевих та ефективних цілей. Існує багато можливостей і слід вивчити можливість використання біогазу. Проте, деякі фундаментальні проблеми залишаються. Найбільша перешкода на шляху ефективного перетворення органічних речовин на біогаз пов'язана з процесом травлення.

Нестійкість лігноцелюлозного матеріалу є основною перешкодою для отримання максимального виробництва біогазу. Використання біологічної попередньої обробки та біоаугментації для підвищення ефективності анаеробного зброджування є недавнім і все ще потребує дослідження. У зв'язку з тим, що біопаливо набуває все більшого значення, біометанізація енергетичних культур за допомогою моноперетравлення для безперервного виробництва поновлюваного біогазу є ще одним напрямком дослідження успішного використання біогазу. Спільне перетворення гною та органічних відходів — це ще одна стратегія, якої біотехнологія потребує дослідження,

щоб зробити біогаз більш життєздатним варіантом. Біотехнологію слід використовувати таким чином, щоб будь-який вид сільськогосподарських відходів можна було легко перетворити на біогаз без утворення або утворення будь-яких шкідливих газів або побічних продуктів. Біогазова установка є джерелом добрив. Субстрат, що розклався, часто званий дигестатом, є цінним добривом, що використовується фермерами. Він багатий азотом, фосфором, калієм і мікроелементами, які можна вносити в ґрунт звичайними гноєрозкидачами. У порівнянні з сирим гноєм тварин, дигестат підвищує ефективність добрив завдяки кращій однорідності та доступності поживних речовин, кращому співвідношенню вуглецю та азоту та значному зменшенню запахів. Для подальшого очищення цього дигестату потрібне використання

біотехнологій. Використання біогазу має безліч переваг для довкілля. Ця «зелена» технологія дозволяє ефективно використовувати відходи, накопичені в результаті виробництва продуктів харчування, та тверді міські відходи, що утворюються внаслідок урбанізації. Перетворення органічних відходів на біогаз знижує вироблення метану, оскільки в процесі ефективного згоряння метан замінюється вуглекислим газом. Видалення сірководню здійснюється в установці біологічної десульфурації, де до біогазу додається обмежена кількість повітря в присутності спеціалізованих аеробних бактерій, що окислюють сірководень до сірки. Це ще одна сфера біотехнології, де процес можна зробити більш ефективним. Поєднання біотехнології зі старою біогазовою технологією може стати прикладом сталого технологічного розвитку.

1.2 Що таке біодобриво

Біодобрива – це препарати, що містять живі або латентні клітини ефективних штамів мікроорганізмів, які при висесенні через насіння або ґрунт сприяють поглинанню поживних речовин культурними рослинами шляхом їх взаємодії в ризосфері. Вони прискорюють певні мікробні процеси в ґрунті, тим самим збільшуючи доступність поживних речовин, які легко засвоюються рослинами, і переводячи поживні речовини з непридатних форм у придатні за допомогою біологічних процесів.

Анаеробне зброджування забирає вуглець, водень і кисень із вихідної сировини. Тим часом основні поживні речовини для рослин (азот (N), фосфор (P) і калій (K)) залишаються в основному в дигестаті. Доступність поживних речовин у дигестаті вища, ніж у необроблених органічних відходах. Наприклад, дигестат має на 25% більше доступного $\text{NH}_4\text{-N}$ (неорганічного азоту) і вище значення рН, ніж необроблений рідкий гній.[1]

Якість і склад зневодненого твердого дигестату залежать від вихідної сировини та процесу зброджування. Крім того, зневоднення розділяє дигестат на дві фракції: клітковину та рідкі стоки. Волокно є об'ємним і містить

низький рівень поживних речовин для рослин, тому його можна використовувати як кондиціонер для ґрунту та як низькоякісне добриво, хоча подальша обробка волокна, наприклад шляхом компостування, може дати якісний компост. З іншого боку, рідкі стоки містять велику частку поживних

речовин і можуть використовуватися як добриво. Високий вміст води в розчині полегшує його застосування за допомогою звичайних методів зрошення. Таким чином, використання клітковини та рідини з анаеробного зроджування призвело до покращеного використання добрив і, отже, до меншого споживання хімікатів у системах вирощування культур.

Незважаючи на цю величезну користь анаеробного дигестату для покращення родючості ґрунту та, як наслідок, урожаю, безпека дигестату виміряна концентрацією наявних патогенів, викликає велике занепокоєння для кінцевих споживачів. Такі патогени, як *Salmonella spp.*, *Escherichia*

coli, *Shigella spp.*, *Klebsiella spp.*, тощо можуть забруднювати біогазовий шлам. Серед них деякі бактерії витривалі і не знищуються під час травлення. Деякі патогени краще виживають у вологому стані, і ці організми все ще можуть бути присутніми в шламі навіть після травлення. Доступність

рідкого біодобрива на ринку зростає як одна з альтернатив хімічним добривам і пестицидам, однією з його переваг є популяція присутніх мікроорганізмів. Погані методи ведення господарства та неналежне використання агрохімікатів призвели як до якості ґрунту, так і до погіршення

навколишнього середовища. Таким чином, спільними цілями біодобрив є забезпечення соціально-економічних та екологічних переваг, серед яких покращення якості ґрунту, що робить величезний внесок у якість і безпеку харчових продуктів, здоров'я людей і тварин, а також якість навколишнього середовища.[2]

1.3 Потенціал органічних відходів

В Україні стрімко розвивається сільськогосподарський сектор, який включає вирощування рослин і щороку утворює велику кількість рослинних

відходів. Вони поділяються на первинні (утворюються в результаті збирання) і вторинні (утворюються при корпоративній переробці). До первинних відходів належать залишки харчових культур і відходи виробництва кукурудзи та соняшнику (стебла, стовпи тощо). [3]. До вторинних відходів належать шкаралупа гречаної крупи та соняшнику, рисовий та буряковий жом.

Частина відходів використовується на потреби самого сільського господарства (органічні добрива, корми для худоби), інша частина використовується в інших галузях економіки, а решта біомаси простоє. Її потенціалом часто нехтують, тому просто спалюють на відкритому просторі або викидають на звалище.

Також швидко розростається кількість тваринницьких комплексів, які мають проблему утворення великої кількості гною та посліду внаслідок життєдіяльності тварин. Станом на 2020 рік, в Україні налічувалось приблизно 13 мільйонів голів худоби [4]. Даний вид відходів є дуже «вибагливим» до методів своєї обробки та утилізації.

Його термічне знешкодження та зберігання на полігонах твердих побутових відходів має низку недоліків: швидке нагромадження полігонів, неповне знищення горючих відходів, токсичний та бактеріологічний склад та утворення канцерогенних сполук. На даний час, розвиток біогазового виробництва швидко зростає: за 2020 рік в Україні ввели в експлуатації 68 біогазових установок. Більшість з них (а саме 28) працюють на отримання біогазу з сировини аграрних комплексів [5], 9 станцій виробляють біогаз внаслідок анаеробного збродження промислових стічних вод, ще на одній біогаз отримують з осаду господарсько-побутових стічних вод. Також більша частина цих нових установок, працює на продаж електроенергії за «зеленим тарифом» [6].

Технологія біогазу підтримує тенденції сталого розвитку та покращує стан ґрунтів та екосистем. У процесі виробництва біогазу утворюються продукти бродіння, що містять багато органічних сполук. Їх можна використовувати як біодобрива, а не як мінеральні добрива. Як органічне добриво дигестат може активувати властивості ґрунту, поглинати парникові гази та підвищувати вміст органічного вуглецю в ґрунті [7]. В Україні є потенціал платних і

безкоштовних ресурсів. Платна сировина - це відходи рослинного походження, які необхідно задалегідь переробити, зібрати та заготовити. В Україні такою сировиною є кукурудзяний силос із середньою урожайністю близько 25 ц/га [8]. Останніми роками попит на кукурудзяний силос значно зріс, але пошук відповідних альтернатив продовжується. До платної сировини входять силосна кукурудза, цукрове сорго, цукровий буряк, солома зернових та інші види субстрату. Оскільки така сировина є нерентабельною для виробництва, її зазвичай не використовують як єдиний субстрат, а, навпаки, доповнюють поживну функцію субстратів для бактерій. До безоплатної сировини відноситься безоплатна сировина або сировина, що утилізується суб'єктами утворення відходів за плату. До такої сировини входять гній тварин, відходи харчового виробництва, побутові відходи, органічний осад із очисних споруд та органічна фракція міських звалищ твердих відходів. Отже, враховуючи технічні можливості, наявність та кількість, перспективними субстратами для анаеробного бродіння в Україні можуть бути курячий, коров'ячий та свинячий гній, жом цукрової тростини та рослинні рештки. Серед рослинних решток солома 36,4% та стебла кукурудзи 34,6% мають основний потенціал для виробництва біогазу. В Україні загалом вищі врожаї, як правило, підвищують загальну ймовірність появи рослинних решток. Однак, завдяки раціональному підходу до утилізації такого виду відходів, приділяють особливо уваги багатому такому продукту як дигестат, тому що він придатний для використання на полях, замість мінерального добрива. Аналіз потенційного виробництва біогазу в сільському господарстві України показав [9], що постачальниками сировини для біогазових установок є приблизно 1,14 млн великої рогатої худоби, 3,4 млн свиней та 118,9 млн птахів. З гною тварин можна отримати до 2,9 млрд м³ біогазу. Однак той факт, що український аграрний сектор значною мірою поділяється на менші фермерські господарства та підприємства, це означає, що значна частина його наявності, фактично, не використовується. Навіть невеликі ферми та невеликі біогазові установки мають проблеми з рентабельністю та відсутністю субстрату.

Дослідження показують, що завдяки рівню розвитку сільського господарства, особливо тваринництва, більше 50% потенціалу біогазу розподілено в п'яти областях: Черкаській, Київській, Вінницькій, Дніпропетровській та Полтавській. Підраховано, що потенціал виробництва біогазу з хімічних добрив може задовольнити 3,17% загальної потреби України в електроенергії або 2,28% потреби в природному газі. Відходи, включно з органічними речовинами, складають у середньому 3,13% від загального обсягу відходів, що утворюються в Україні щороку [10]. Але варто зазначити, що приблизно 15 мільйонів тонн цих відходів можуть бути використані в енергетичних цілях.

Крім того, найбільш перспективними є відходи рослин, відходи тварин, сеча, добрива та осад промислових стічних вод.

1.4 Органо-мінеральні залишки після отримання біогазу з відходів як комбіновані складні добрива для сільського господарства.

У нативному (необробленому) гної свиней, великої рогатої худоби і торфї зазвичай присутня велика кількість насіння бур'янів. Так, в 1 тонні свіжого гною знаходиться до 10 тис. насіння різних бур'янів, які, пройшовши через шлунок тварин, не втрачають здатність до проростання. Це призводить до втрати врожаю від 4 до 7 центнерів злакових культур з одного гектара. Через органічні добрива часто поширюється багато збудників захворювань рослин та тварин. Наприклад, у гної можуть міститися понад 100 небезпечних збудників хвороб: сибірська виразка, туберкульоз, бруцельоз, паратиф, паратуберкульоз, ящур, сальмонельоз, аскаридоз, кишкові інфекції та інші.

Грам свинячого гною має мікробну забрудненість, клітин біля $3,6 \cdot 10^9$, у тому числі спорових анаеробів від 10^2 до 10^4 . Органічні добрива не повинні мати мікробне забруднення. В той же час, у 1 грамі необробленому гною міститься у 10^9 колоній різних мікроорганізмів, в тому числі і патогенних. Тому гній та інші органічні відходи сільського господарства перед внесенням у ґрунт потребують проведення тривалої (6-12 місяців) підготовки для знешкодження патогенної мікрофлори. Для цього використовують компостування, але при

ньому в компості втрачаються корисні речовини, і забруднюється повітря парниковими газами. Крім цього, значна кількість поживних елементів вимивається з ґрунту (за сезон вимивається близько 80% органічних добрив, тому доводиться їх щорічно додавати у великих кількостях). Недостатня

кількість азоту у ґрунті призводить до зниження врожайності багатьох сільськогосподарських культур. Також гальмується ефективний ріст рослин, послаблюється їх стійкість до різних хвороб. Тривале азотне голодування призводить до гідролізу білків і руйнування хлорофілу. При тривалому зберіганні органічних відходів втрачається до 50% азоту, і вони наносять

екологічну шкоду ґрунту та ґрунтовим водам. Більш екологічною технологією знешкодження та утилізації гною є його анаеробна біоконверсія у заброджене добриво і біогаз. Під час конверсії відходів у біогаз відбувається

знешкодження відходів, розклад складних полімерів до простих сполук, більш відновлених і доступних для рослин. Таким чином, заброджена біомаса після метантенка за багатьма показниками в кілька разів краще за інші добрива (нативні гній, послід, торф та хімічні). Ось деякі з цих показників:

- Відсутність насіння бур'янів.

- Відсутність патогенної мікрофлори.

- Наявність активної мікрофлори, яка сприяє інтенсивному росту рослин. В забродженій масі після метантенку міститься біля 10¹⁴ колоній мікрофлори на грам, при цьому повністю відсутня патогенна мікрофлора.

- Відсутність адаптаційного періоду. Заброджені добрива (завдяки своїй формі) починають ефективно працювати відразу після внесення у ґрунт.

- Добриво у вигляді забродженої маси в порівнянні з нативним гнієм, вимивається з ґрунту не більше 15%. Таким чином, внесені на поля у невеликій кількості заброджені добрива не втрачають свою ефективність на 3-5 років довше, ніж звичайні добрива.

- Максимальне збереження і накопичення азоту. Завдяки анаеробному зброджуванню органічних відходів у біогазовій установці кількість загального азоту зберігається повністю, крім того, вміст розчинного азоту NH_4 збільшується на 10 - 15%.

- Заброджені органічні добрива є екологічно-чистими добривами [11].

1.5. Економічний потенціал перетворення біовідходів на добриво

Економічний аналіз показав, що енерговитрати хімічних добрив становлять найбільшу частку в загальних енерговитратах через неефективне використання добрив, так що фермери, як правило, використовують більше добрив, ніж потрібно [12]. Щоб подолати проблеми навколишнього середовища та здоров'я, пов'язані з надмірним використанням цих хімічних речовин, необхідно застосовувати ефективне управління енергією та ресурсами для сільськогосподарського виробництва. Це призведе до мінімізації впливу на навколишнє середовище, збереження природних ресурсів та зменшення відходів. Одна з головних екологічних проблем пов'язана з утворенням стічних вод та їх несприятливим впливом на екосистему при скиданні в річки, ґрунти чи моря. Кількість побутового та промислового шламу, що викидається на звалища, зросла разом із сучасним способом життя та урбанізацією в усьому світі. Деякі з цих осадів стічних вод містять органічні матеріали, такі як бактерії, цвіль, поживні речовини та інші молекули, які демонструють потенціал для їх використання як добрив [13]. Були проведені економічні дослідження відновлення струвіту, високоякісного добрива, що повільно виділяється, зі стічних вод [14]. Були розглянуті економічні компоненти, які включають повномасштабне підприємство з виробництва добрив, ціну продажу струвіту, експлуатаційні витрати, чистий дохід та багато іншого. Результати після оптимізації експериментальних умов показали, що процес можливий з відносно коротким періодом окупності в шість років. Існував також високий потенціал для отримання прибутку, що вдвічі перевищує початкову інвестицію, оскільки

ціна струвиту може бути вищою на основі його застосувань, таких як бутикові добрива [15].

Інше дослідження виробництва добрив із сирого осаду стічних вод зіткнулося з труднощами у видаленні небажаних сполук, таких як важкі метали, та висушуванні осаду, де оптимальний процес швидкого випаровування незв'язаних молекул води був важливим [13]. Розроблене економічне рішення для переробки мулових відходів передбачає висушування мулу в умовах низького вакууму, мінімізуючи його об'єм, енергоспоживання, потреби у зберіганні та витрати на транспортування. Наночастинки магнетиту хітозану використовувалися для видалення важких металів, і переробка цих наночастинок є важливою для обґрунтування економічного потенціалу промислової переробки. Крім того, витрати на осушення можна зменшити за рахунок використання біогазу, отриманого шляхом біоферментації осаду стічних вод. З економічної точки зору, ці висновки можуть сприяти доцільності переробки стічних вод для виробництва добрив, що сприяє сталому управлінню відходами [16]. Енергію, яку виробляє мул у стічних водах, можна використовувати в різних комбінаціях, наприклад, біогаз, отриманий у результаті анаеробного бродіння, можна використовувати для живлення системи обробки мулу. Остаточний сухий осад можна використовувати для удобрення сільськогосподарських і несільськогосподарських полів, а також спалювати, щоб стати паливом [13].

Польовий експеримент, проведений на кормовій кукурудзі шляхом зміни використання хімічних, органічних і біодобрив, показав, що використання половини порції добрива, що містить зелений компост і біодобриво, дало найменші витрати [17]. Незважаючи на те, що більший обсяг виробництва біомаси був отриманий від хімічних добрив, найвищий чистий прибуток спостерігався при використанні біодобрива з ефективними мікроорганізмами або біологічного калійного добрива. Добрива NPK дають швидкий ефект і можуть досягти високого врожаю за короткий час, але

біодобрива є відновлюваними, і їх ефект триває протягом більш тривалого періоду з багатьма додатковими перевагами для росту рослин [18]. Перетворення твердих побутових відходів на компост для виробництва розсади також має хороший економічний потенціал. Заміна торфу компостом може знизити вартість субстратів до 23%. Це скорочення може призвести до збільшення маржі внеску бізнесу на виробництво сільськогосподарських культур на 2,9%. Постачання компосту є у великій кількості та є стабільним, оскільки він одержується як побічний продукт, що утворюється з твердих відходів, що дозволяє перетворювати компост на добрива з доданою вартістю, які продаються за безпечною ціною [19]. Таким чином, компостування робить величезний внесок в ефективне управління ресурсами відходів, а також додає економічну цінність відходам шляхом переробки поживних речовин і компонентів субстрату у відходах. Кращих економічних перспектив можна досягти за допомогою комбінації біо- та органічних добрив разом із хімічними добривами для сприяння технології сталого виробництва сільськогосподарських культур [17]. Завдяки цьому існує великий економічний потенціал у перетворенні біовідходів, що може призвести до зниження середньої вартості середовищ, які використовуються для росту сільськогосподарських культур.

1.6. Вплив добрив і біодобрив на навколишнє середовище

Було розроблено різні типи біодобрив завдяки їхньому потенціалу як більш екологічної, економічної та сталої альтернативи неорганічним добривам. Біодобрива відіграють важливу роль у збереженні родючості ґрунту, а також у продуктивності рослин. Наприклад, мікориза, тип грибів, широко поширених у ґрунтах, може сприяти споживанню фосфору рослинами, покращувати стійкість до корневих патогенів і підвищувати стійкість рослин до екологічного та біологічного стресу. Ця грибкова система має здатність поширюватися на широку територію для вилучення поживних речовин і протистояти несприятливим умовам [20]. Крім того, біопереробка

макрроводоростей для інтегрованого виробництва палива, біомаскул і добрив може сприяти відновленню навколишнього середовища та пом'якшенню клімату. Це видно через вирощування морських водоростей, які можуть діяти як біофільтр, оскільки ці морські водорості витягують надлишок азоту, фосфору, вуглекислого газу та забруднювачів важких металів із водної системи під час процесу вилову. Отже, це призведе до більш чистих і безпечних джерел води для здоров'я людини та навколишнього середовища [21].

Процес компостування сприятиме сталому управлінню органічними відходами, оскільки ці відходи можна повторно використовувати як цінні джерела добрив [22]. Компостування є простим і швидким у застосуванні, крім того, воно має менші екологічні та соціальні витрати порівняно з іншими методами утилізації органічних відходів, такими як захоронення та спалювання. Це також дозволяє ефективно управляти потоками відходів, зменшує кількість органічних речовин на звалищах і знижує викиди парникових газів. Дослідження показали, що це здійсненна стратегія для перетворення цих відходів у компост із високою цінністю добрива. Використання поправок для компосту та зеленого добрива також може зменшити викиди N_2O з ґрунту без збільшення викидів CO_2 . Дослідження використання сидератів для зменшення викидів парникових газів із ґрунту в зрошуваних системах виробництва кукурудзи показало зниження на 28% потоків N_2O та потенціалу глобального потепління [23].

Аналіз життєвого циклу (LCA) виробництва добрив має важливе значення для створення планів протидії та зменшення впливу на навколишнє середовище. Категорії оцінки життєвого циклу, які існують у процесі виробництва добрив включають використання землі, парниковий ефект, зміну клімату, токсичність для людини, підкислення, евтрофікацію та виснаження викопного палива. Мартінес-Бланко та ін. провели аналіз життєвого циклу

двох типів компостування, домашнього та промислового компостування. (2010). Було виявлено, що система промислового компостування потребуватиме більше енергії, оскільки потребуватиме транспортування великої кількості біовідходів. Утворення відходів і викиди

летких органічних сполук (ЛОС) від промислового компостування набагато

вищі, хоча викиди газів, таких як NH_3 , N_2O та CH_4 , нижчі порівняно з домашнім компостуванням. Це пов'язано з процесами біофільтрації, доступними в промислових процесах для фільтрації вихлопних газів

[24]. Загалом було встановлено, що промислове компостування має більший

вплив з точки зору потенціалу руйнування озонового шару, потенціалу фотохімічного окислення та кумулятивного попиту на енергію, де слід досліджувати розробки процесів біофільтрації ЛОС та методів мінімізації

енергії, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище. система [24]. Оцінка

життєвого циклу ПГ також була проведена для органічного виробництва рису

з використанням органічних добрив замість хімічних. Практика затоплення рисових полів під час вирощування призводить до анаеробних умов, які сприяють утворенню та виділенню газів метану. Найбільший внесок у викиди

ПГ становили викиди на полі порівняно з процесом посіву, культивування та

транспортування. Використовуючи органічні добрива, такі як насіння сидератів, сільськогосподарський мній, компост і біоферментований сік, отриманий у процесі бродіння, викиди парникових газів були набагато

нижчими (0,58 кг CO_2 на кг рису-пади) порівняно з виробництвом рису з

використанням хімічних добрив. Практика виробництва рису також може

бути додатково скоригована шляхом скорочення періоду затоплення та застосування альтернативних методів змочування та сушіння для збереження води та пом'якшення викидів метану [25].

1.7. Біодобриво в сільськогосподарській практиці

Біодобрива складаються з корисних для сільського господарства мікроорганізмів, які можуть покращувати стан ґрунту та ріст рослин шляхом

мобілізації доступних поживних речовин своєю біологічною активністю. Присутні мікроби виділяють багато сполук для покращення здоров'я та поживних речовин, які сприятимуть росту рослин [26]. Ці мікроорганізми також беруть участь у життєвому циклі рослин через розкладання органічної речовини, фіксацію азоту та надходження до рослин, а також солубілізацію нерозчинних фосфатів. Біологічне удобрення приносить переваги ґрунту та виробництву сільськогосподарських культур, але ця практика також має свої обмеження, і її доцільність необхідно вивчити, щоб оцінити її потенційне використання в майбутньому.

Використання комбінації органічних і хімічних добрив показало значне покращення врожайності сільськогосподарських культур і органічного вуглецю в ґрунті. Незважаючи на здатність NPK добрив швидко прискорювати ріст культур на початковій стадії, використання органічних добрив сприятиме загальному росту рослин і вмісту органічного вуглецю в ґрунті в довгостроковій перспективі [27]. Комбінація органічних і хімічних добрив також дозволяє досягти порівнянної продуктивності з традиційними джерелами N і P, і в той же час, зменшуючи втрати поживних речовин за рахунок використання органічних матеріалів [28]. Крім того, включення органічних поправок покращить екологічні переваги, оскільки більшість цих біодобрив отримують із відходів. Це створить стійкий та ефективний процес удобрення в довгостроковій перспективі, одночасно зменшуючи забруднення навколишнього середовища. Важливо, щоб збалансоване харчування з достатньою кількістю азоту та інших поживних речовин надавалося культурам для отримання високої врожайності та якісної продукції [29]. Крім того, загальновідомо, що біодобрива мають помітні характеристики для підвищення біологічної родючості ґрунту та пригнічення патогенів, що передаються через ґрунт. Тривале застосування хімічних добрив з часом призведе до зменшення кількості бактерій у ґрунті. Таким чином, біодобрива допоможуть у регулюванні біологічних властивостей ґрунту та зміцнять структуру

мікробного співтовариства для виробництва здорових ґрунтових мікробів [27]. Комбінація біодобрив із хімічними добривами також є перспективним підходом до збереження балансу мікробіоти ґрунту в безперервному циклі вирощування сільськогосподарських культур, що пояснюється здатністю біодобрива інкапсулювати корисні бактерії, що допомагає регулювати функціональні бактерії на полях посівів [28]

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Отримання біогазу

Серед біотехнологій переробки й утилізації вторинної сировини сільськогосподарського виробництва однією з найбільш перспективних є метанове зброджування, яке дозволяє отримувати високоякісні знезаражені органічні добрива, а також біогаз як поновлюване джерело енергії.

Використання збродженого гною, порівняно зі звичайним, дає змогу одержувати у 1,5 рази вищу врожайність сільськогосподарських культур

Дослідним шляхом встановлено, що втрати азоту при використанні існуючих технологій отримання добрив складають у середньому 24,5%, а при метановому зброджуванні не перевищують 5%. Для отримання 1 кг по діючій речовині хімічних азотних добрив, витрачається 2 кг умовного палива.

Бактеріальна стерилізація гнойової біомаси після анаеробного метанового зброджування оцінюється в 94-98 %, відбувається дезодорація, дегельментизація, а також значне зниження схожості насіння бур'янів.

Крім того, метанове зброджування дає можливість отримувати біогаз, який за своїми характеристиками дуже близький до природного газу. За теплотою згорання 1 м³ біогазу рівноцінний 0,7 м³ природного газу, або 0,8 л дизельного палива. Переробка відходів від однієї корови дає 2,5 м³ біогазу на добу, від однієї голови ВРХ на відгодівлі 1,6 м³ на добу.

Метаногенез (біологічний синтез метану) один з найважливіших етапів ланцюга анаеробного розкладання органічних сполук. Цей процес відбувається без O₂, і термінальними акцепторами електронів виступають інші сполуки.

Сполуки використовуються мікроорганізмами як акцептори електронів.

Анаеробне розкладання органічних речовин прокариоти. Більшість еукаріотів не бере участі в цьому виконують процесі. Характерним моментом анаеробного розкладання є поступове окислення вуглецевих сполук, яке

поетапно проводять різноманітні групи мікроорганізмів, які утворюють складний комплекс мікробної спільноти. Між цими мікробними групами існують спеціалізовані взаємовідносини. В анаеробних умовах різноманітність шляхів метаболізму значно більша ніж в аеробних, тому що окислення вуглецевих сполук відбувається шляхом деградування і пов'язане з перенесенням водню на різні субстрати проміжного метаболізму чи на зовнішні акцептори електронів.

Першу фазу (гідролітичну) проводять різні групи мікроорганізмів (факультативні і облигатні анаEROБИ), проте в цій фазі енергія тільки витрачається. Утворення енергії відбувається в другій фазі (бродиння, ацетогенна), яка проводиться тією ж групою мікроорганізмів, що беруть участь в першій фазі, а також деякими іншими (лактобацили, стрептококи тощо), які не трансформують полімери, оскільки вони не мають екзоферментів для гідролізу полімерів. Зазвичай, ці дві фази розглядають спільно, оскільки вони енергетично об'єднані.

В третій фазі (ацетогенній) утворюється переважно ацетат, в четвертій (метаногенній) метан.

Деякі продукти фази бродиння, минаючи ацетогенну фазу, безпосередньо трансформуються в CH_4 . Попередниками CH_4 , при цьому є CO_2 , H_2 , CO метиламін, метанол, ацетат, форміат. Інша частина продуктів бродиння (кислоти з числом вуглецевих атомів більше двох і спирти більше одного) повинні пройти ще ацетогенну фазу (ацетогенез з утворенням H_2), в якій утворюється ацетат (попередник CH_4) і одночасно H_2 .

Цей процес проводиться представниками *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Thermanaerobium*, *Desulfovibrio* тільки в умовах низького парціального тиску.

В зв'язку з цим ацетогенні мікроорганізми існують в синантрофній спільноті з метаногенними та сульфатредуючими бактеріями. У цій спільноті існує

міжвидовий перенос водню. Це фундаментальний принцип проходження анаеробної деструкції органічних сполук.

Існує ще один проміжний етап, при якому ацетат утворюється з H_2 і CO_2 .

Це відбувається у тому випадку, якщо в екосистемі наявна велика кількість H_2 .

CO_2 . Утворення CH_4 являє собою процес, який постачає енергію метаногенним бактеріям. Різноманітні субстрати забезпечують різні рівні отримання енергії.

Більшість метаногенних бактерій спроможні використовувати H_2 і CO_2

для утворення CH_4 , в той час, як лише п'ята частина описаних до цього часу видів використовує ацетат, метанол чи метиламін. У 1956 р. Г. Баркер об'єднав метаногенні бактерії в одну таксономічну групу на основі їх фізіологічних особливостей. Серед дев'яти названих ним видів, вірогідно, тільки три було представлено чистими культурами. *Methanobacterium formicicum*.

Methanostreptococcus barkei, *Methanococcus varnieli* Представники інших видів змішані культури. В подальшому список видів метаногенів поповниться.

Технологічні параметри процесу метанового зброджування достатньо добре досліджені. Для підвищення швидкості ферментних реакцій необхідним є дотримання таких вимог, наявність анаеробних умов, ORP 7,0-8,0, співвідношення C/N рівне 10-30, дотримання відповідної температури.

Дослідним шляхом встановлено, що оптимальний вміст легких жирних кислот (ЛЖК) в субстраті для метанового зброджування має бути у межах 600-

1500 мг/л. Вплив температури на процес метанового бродіння досліджувався багатьма вченими, оскільки температура є одним із найважливіших факторів процесу. Виявлені температурні оптимуми для мезофільного процесу $33^\circ C$ і для термофільного $54^\circ C$. Незважаючи на те, що процес розкладання целюлози

у термофільних умовах проходить в 14 раз інтенсивніше, ніж в мезофільних, а кількість отриманого біогазу на 25-30% вища у термофільних умовах, термофільні процеси мають меншу стабільність, ніж мезофільні, а допустимі

коливання температури значно знижуються. В мезофільному режимі допустимі значення коливань температури складають $\pm 2,8^{\circ}\text{C}$, а при термофільному режимі не повинні перевищувати $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Час процесу ферментації біомаси (експозиція зброджування) також є одним із важливих параметрів процесу метанового зброджування. В більшості випадків при переробці гнойової біомаси процес метаногенезу відбувається протягом 24-28 діб і більше. На практиці експозицію метанового зброджування з метою отримання біогазу встановлюють в залежності від температури, ступеня розкладу та вмісту органічних речовин у таких інтервалах: при $10-25^{\circ}\text{C}$ - до 30 діб, при $25-40^{\circ}\text{C}$ - від 10 до 20 діб, при $45-55^{\circ}\text{C}$ - від 4 до 8 діб.

Ступінь розкладання органічної речовини (біоконверсія) безпідстилкового гною залежить від експозиції.

Максимальний ступінь біоконверсії органічної речовини 53% (технічне зброджування) досягається лише за довгострокової експозиції і на практиці не використовується. Дослідження показали, що кращі органічні добрива при метановому зброджуванні у мезофільному режимі були отримані за ступеню біоконверсії органічної речовини 30-33%, при цьому відзначався максимальний вихід біогазу. Для досягнення такого рівня біоконверсії органічної маси у проточних реакторах повного змішування необхідна експозиція 20-22 доби з відповідним щодобовим завантаженням 4,5-5,0% робочого об'єму реактора. Якщо установка використовується лише з метою отримання якісного органічного добрива, то добове завантаження можна збільшити до 7%, при цьому експозиція зброджування складе 14-15 діб, а ступінь біоконверсії органічної маси сягатиме 25%.

Ефективність біогазових установок в основному залежить від кількості виробленого біогазу. Дослідження зарубіжних і вітчизняних фахівців показали, що вихід біогазу залежить від складу субстрату для зброджування,

його попередньої підготовки, дотримання оптимальних параметрів і режимів процесу анаеробного зброджування (табл. 4.1) [30].

2.2 Сучасні біотехнології у виробництві органічних добрив.

Існує два головних напрями утилізації органічних відходів, які зображені на рисунку 1.



Рис. 1

Першим способом переробки органічних відходів є компостування. **Компостування** – технологія перетворення органічних відходів у високоякісні добрива з великим вмістом живильних компонентів. Компост, який вноситься до ґрунту, повинен бути незараженим від яєць паразитичних організмів, містити в своєму складі спори корисних бактерій та грибків, які будуть здатні оновлювати мікрофлору ґрунту. Такий спосіб оживлення мікрофлори імітує природню здатність землі до оновлення, який без втручання людини проходив десятки років. Компост, з додаванням таких біологічних компонентів, здатен збільшити врожайну силу землі, яка внаслідок змін пір року виснажує власні запаси мікрофлори. Тому, додаючи компост саме такого складу, результатом стане оновлена живильна здатність мікрофлори землі, яка

покращує біологічні процеси. У процесі компостування можуть використовуватися усі види решток різних промисловостей: харчової, промислової та аграрної, а саме рослинного та тваринного походження, в тому числі великої рогатої худоби, свинячих комбінатів, комплексів птахівництва, а також можливо й компостування міських відходів: опале листя, суху траву, солому, гілки кущів та дерев.

Іншим способом переробки органічних відходів, достатньо перспективним, є процес **анаеробного зброджування**. Анаеробне зброджування відходів зменшує великий обсяг екологічних забруднень, покращує стан оточуючого середовища, безпосередньо допомагає у боротьбі із забрудненням повітряного та водного середовищ, зменшує викиди парникових газів. Крім цього, цей процес дає змогу отримати високоякісне добриво у вигляді вторинного продукту – біогумусу та вихід енергії у формі біогазу. Існує два головних режими температури для анаеробного зброджування: термофільний (від 40 до 55° С) та мезофільний (від 25 до 40° С). При мезофільному режимі, анаеробне збродження відбувається значно повільніше та має значно менший вихід біогазу, але навіть при такому режимі роботи реактори є більш популярними, бо їх енергопопит набагато менший, ніж у реакторів для термофільного режиму [31].

Біотехнології можуть відігравати значну роль у виробництві органічних добрив з відходів виробництва біогазу. Відходи виробництва біогазу, такі як дигестат та гній, містять органічні речовини та поживні речовини, які можуть бути використані як органічні добрива (Hidayat et al., 2022). Використання органічних добрив має низку переваг, включаючи покращення родючості ґрунту, підвищення доступності поживних речовин для рослин та зменшення залежності від синтетичних добрив).

Одним із підходів до виробництва органічних добрив з відходів виробництва біогазу є процес анаеробного зброджування. Анаеробне зброджування передбачає розщеплення органічних матеріалів за відсутності кисню, в

результаті чого утворюється біогаз і багатий на поживні речовини дигестат.

Дигестат можна додатково переробляти для отримання цінного органічно-мінерального гранульованого добрива. Цей процес не тільки допомагає в

управлінні відходами виробництва біогазу, але й забезпечує стале джерело

органічних добрив для сільськогосподарських цілей.

Окрім анаеробного зброджування, для перетворення відходів виробництва біогазу на органічні добрива можна використовувати інші біотехнологічні

методи. Наприклад, доведено, що використання мікробних біофакторів сприяє росту рослин і засвоєнню поживних речовин з альтернативних

фосфорних добрив (Thonar et al., 2017). Ці біофактори можуть підвищити

вміст поживних речовин та доступність органічних добрив, отриманих з відходів виробництва біогазу, що робить їх більш ефективними для підтримки

росту рослин.

Крім того, розробка та виготовлення біодигестерів з використанням геомембранних матеріалів з поліетилену високої щільності (HDPE) може

сприяти переробці відходів, що біологічно розкладаються, на біогаз та органічні рідкі добрива (Kriga et al., 2023). Ця технологія забезпечує стале

рішення для управління відходами, одночасно виробляючи цінні органічні добрива.

Утилізація відходів виробництва біогазу як органічних добрив не тільки корисна для сільськогосподарських цілей, але й для екологічної стійкості. Це

зменшує залежність від синтетичних добрив, які можуть мати негативний вплив на здоров'я ґрунту та якість води (Бломенштейн та ін., 2015). Крім того,

виробництво органічних добрив з відходів виробництва біогазу сприяє розвитку циркулярної економіки, перетворюючи відходи на цінні ресурси.

Отже, біотехнологія пропонує багатообіцяючі можливості для виробництва органічних добрив з відходів виробництва біогазу. Завдяки таким процесам,

як анаеробне зброджування та використання мікробних біофакторів, відходи виробництва біогазу можуть бути перетворені на багаті на поживні речовини

органічні добрива, які підтримують ріст рослин та покращують родючість ґрунту. Цей біотехнологічний підхід не лише вирішує проблему утилізації відходів, але й сприяє сталому розвитку сільського господарства та збереженню навколишнього середовища.

Визначення виходу залишкової продукції

Після зброджування гнійної біомаси і одержання біогазу, залишається тверда фракція гною (шлам) і надосадова рідина (рідка фракція). Кількість твердої і рідкої фракції залежить як від вологості гною, який завантажується, так і вологості фракцій, які одержуємо (твердої і рідкої).

В середньому з 1 кг органічної речовини біологічно розкладеної на 70%, можна одержати 0,5 кг біогазу, 0,2 кг води і 0,3 кг нерозчиненого залишку шламу.

Поділ біомаси після зброджування в реакторі на тверду і рідку фракції можна проводити з допомогою сепаратора (центрифуги) або віброгрохота. Тверда фракція гною містить значну кількість поживних речовин і може використовуватись як цінне знешкоджене органічне добриво або кормові добавки.

Анаеробна ферментація гнойової біомаси супроводжується зменшенням у шлам майже на 50 % сухої органічної речовини порівняно з вихідним гноем за рахунок включення 10-15% вуглецю субстрату у мікробіальну масу, а також у такі компоненти біогазу, як метан і діоксид вуглецю.

Склад шламу залежить від хімічного складу вихідної сировини, а також параметрів процесу біометаногенезу.

При зброджуванні гною в ньому зберігаються необхідні для рослин біогенні елементи (N, P, K) і поживні речовини знаходяться в більш доступній формі, що забезпечує підвищену біологічну активність шламу як органічного добрива. Крім того шлам містить значну кількість білків і вітаміну В₁₂, за

рахунок чого його можна використовувати як білково-вітамінну кормову добавку. [30]

Органічні добрива – добрива, що містять елементи живлення рослин переважно у формі органічних сполук. Вони складаються з речовин тваринного і рослинного походження, які, розкладаючись, утворюють мінеральні речовини (азот, фосфор, калій, кальцій та інші), при цьому в приземний шар виділяється діоксид вуглецю, необхідний для фотосинтезу рослин. Крім того, органічні добрива позитивно впливають на водне і повітряне живлення рослин, сприяють розвитку ґрунтових бактерій та мікроорганізмів, які живуть в симбіозі з корінням сільськогосподарських культур і допомагають їм отримати доступні поживні елементи. До органічних добрив відносяться: гній, торф, пташиний послід, солома, тирса, зелені добрива, сапропель, дефекація, буре вугілля, відходи сільськогосподарського і промислового виробництва. Органічні добрива містять у своєму складі всі необхідні рослинам елементи живлення, є джерелом життєдіяльності та енергії для розвитку ґрунтових мікроорганізмів і незамінними запасами органічних речовин для підтримки родючості ґрунту.

Введення дигестату анаеробного збродження

Анаеробне збродження виробляє два основних продукти: дигестат і біогаз. Дигестат анаеробного збродження (AD), також званий залишками біогазу (суспензія та шлам), є багатим на поживні речовини біодобривом, що є органічним продуктом мікробної ферментації після виробництва біогазу в генерації метану. Усі види органічних залишків і відходів, таких як курячий послід, енергетичні трави, рослинні відходи, лушпиння солоду, харчові відходи, кухонні відходи, кукурудзяний силос, трав'яний силос, рідкий гній свиней, рідкий гній великої рогатої худоби, стара кулінарна олія, стружка жиру, флотажний шлам, гліцерин, відходи бойні можуть бути вхідними матеріалами для біогазової установки, отже, біогазові залишки багаті органічними речовинами, NPK-елементами, гуміновими кислотами,

вітамінами, ауксином і гібереліном, які необхідні для отримання оптимальної врожайності, що робить їх високоефективними біодобрива класу. Його цілком можна використовувати в сільському господарстві для збереження та переробки поживних речовин, а також для зменшення викидів відходів і використання хімічних добрив.

Поживна цінність дигестату

Як ми знаємо, багато різних вхідних субстратів можуть бути використані як вхідні матеріали біогазової установки. Ці матеріали змінюються залежно від різних поживних речовин. Енергетичні культури, поживні залишки, макулатура, скошена трава, залишки їжі, стічні води, як правило, мають більший вміст сухої речовини та кращий склад поживних речовин, ніж гній, що призводить до більш концентрованого та цінного дигестату.

2.3 Виробництво органічних добрив із відходів біогазового виробництва

Перше завдання полягало в тому, щоб культивувати десять видів рослин (цукровий буряк Ельвіра, кукурудзу Каннаваро та Атлетіко, сукросоргум, кич, бобові трави, білкі та рубік топінамбур, прогас та жито Палаццо) та вибрати ті з найбільш перспективних фізико-хімічних характеристик, які заохочуватимуть отримання врожаю та виробництво біогазу.

Наступним завданням було виконати процес анаеробного зброджування окремих субстратів і відповідних сумішей (косубстратів). Перед виробництвом біогазу субстрати були належним чином фрагментовані (довжина нарізки становила 10 мм). Згодом субстрати та інкулянт (дигестат із сільськогосподарської біогазової установки з використанням лише партії рослин) були піддані детальному фізико-хімічному аналізу, щоб виключити аномалії під час виробництва біогазу. Процес анаеробного зброджування проводили у трьох повторах для кожного субстрату. Дослідження

періодичного процесу проводили у тридцяти ферментерах (евдіометрах) ємністю 1 л при 38 °С.

На наступному етапі субстрати з найбільшим виходом біогазу були піддані безперервному процесу анаеробного зброджування, щоб відобразити умови процесу, що відбуваються в реальній сільськогосподарській біогазовій установці. Дослідження проводили в повністю автоматичних ферментерах безперервної дії об'ємом 10 л в умовах, що відповідають реальній сільськогосподарській біогазовій установці з постійним завантаженням камерного метантенку (3,5 кг VS/м³ /добу — 3,5 кг летких речовин на кубічний метр на добу). Температура процесу становила 38 °С, перемішування проводили циклічно кожні 4 години протягом однієї хвилини зі швидкістю 60 об/хв (обертів за хвилину). Після процесу анаеробного зброджування проводили фізико-хімічні аналізи утвореного дигестату. Це для визначення ступеня зброджування субстратів з визначенням ступеня збереження різних сполук у перетравленій культурній масі перед використанням її як добрива. Дигестат аналізували в трьох формах: рідкий, безпосередньо після анаеробного зброджування (перед сепаратором), утворений після відділення на сепараторі твердої фракції (згущується на сепараторі) і рідкий (отриманий в результаті дегідратації дигестату на сепараторі — стічні води).

Метою наступного кроку була розробка інноваційної технології перетворення твердого дигестату в гранульований органо-мінеральний добрив. Процес включав додавання вапна та біогенних елементів, які підвищували б родючу цінність вибраних рослин. Дослідження проводили в циклічному реакторі MLH 6, пристосованому для виробництва гранул добрив. Ємність реактора становить від 1,2 до 4,8 л, він має максимальний робочий час на цикл 15 хвилин і може працювати зі швидкістю обертання мішалки від 70 до 275 об/хв. Процес гранулювання можливий в результаті інтенсивної екзотермічної реакції гідролізу між високоактивним вапном і водою, що міститься в дигестаті, що відбувається при температурі навіть 135-

140 °C (все тепло, що виділяється в процесі, походить від реакції гідролізу вапна). Продукт — цінне органо-мінеральне гранульоване добриво мало мати аналогічні властивості з добривом Поліфоска ПЛус. Пропорція, використана для оцінки кількості відповідних біогенних компонентів, була наступною:

N:P:K:Mg:S = 5:10:20:7:9. Зрештою, під час досліджень пропорції поживних речовин у грануляті змінили на: N:P:K = 5:9:11.

Результати дослідження були піддані статистичній обробці на основі програмного забезпечення Statistica 12 PL. Визначено середні значення вимірювань, похибки вимірювань. Багатокритеріальний пакетний аналіз

ANOVA показав важливість впливу відношень і C/N на вихід біогазу. Модель множинної регресії була використана, щоб показати залежну змінну Q_1 від V_S і C/N. Точність прогнозу оцінювали за коефіцієнтом детермінації (R^2),

середньою квадратичною помилкою прогнозу (RMSE). У моделях прогнозування більш високі значення R^2 у поєднанні з нижчими значеннями

RMSE є показниками перевірки свердловини.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Фактори, що визначають виробництво гранульованого добрива

Основними субстратами для виробництва гранульованого добрива були силос із сорго та кукурудзи. Завдяки лігноцелюлозній структурі вони були чудовим «риштуванням» для виготовлення органе-мінеральних гранульованих добрив. Собівартість придбані кукурудзи дуже висока, тому в якості гранульованої основи було обрано сорго. На основі безперервного процесу анаеробного зброджування, що відображає роботу фактичної сільськогосподарської біогазової установки, було встановлено, що для виробництва гранульованого добрива використовувалася суміш субстратів, яка включала сорго, буряк, жито та траву в таких пропорціях: 20%:60%:10%:10%. Ці ко-субстрати вирізнялися найвищим виходом біогазу та метану, а також урожаєм рослин порівняно з іншими п'ятьма запропонованими сумішами. У таблиці 1 представлені основні параметри субстратних сумішей, для яких вихід біогазу наведено на рисунку 1. Зокрема, вміст VS, C/N, а також вміст P і K є важливими для виходу біогазу. Множинний регресійний аналіз (Таблиця 2) підтвердив значний вплив на рівні $p < 0,000$ проти вмісту та співвідношення C/N на вихід біогазу. Ці результати пояснюють вихід біогазу для шести протестованих сумішей субстратів. Після анаеробного зброджування на сепараторі віджимали дигестат, отриману тверду фракцію використовували для подальших досліджень (рис. 2).

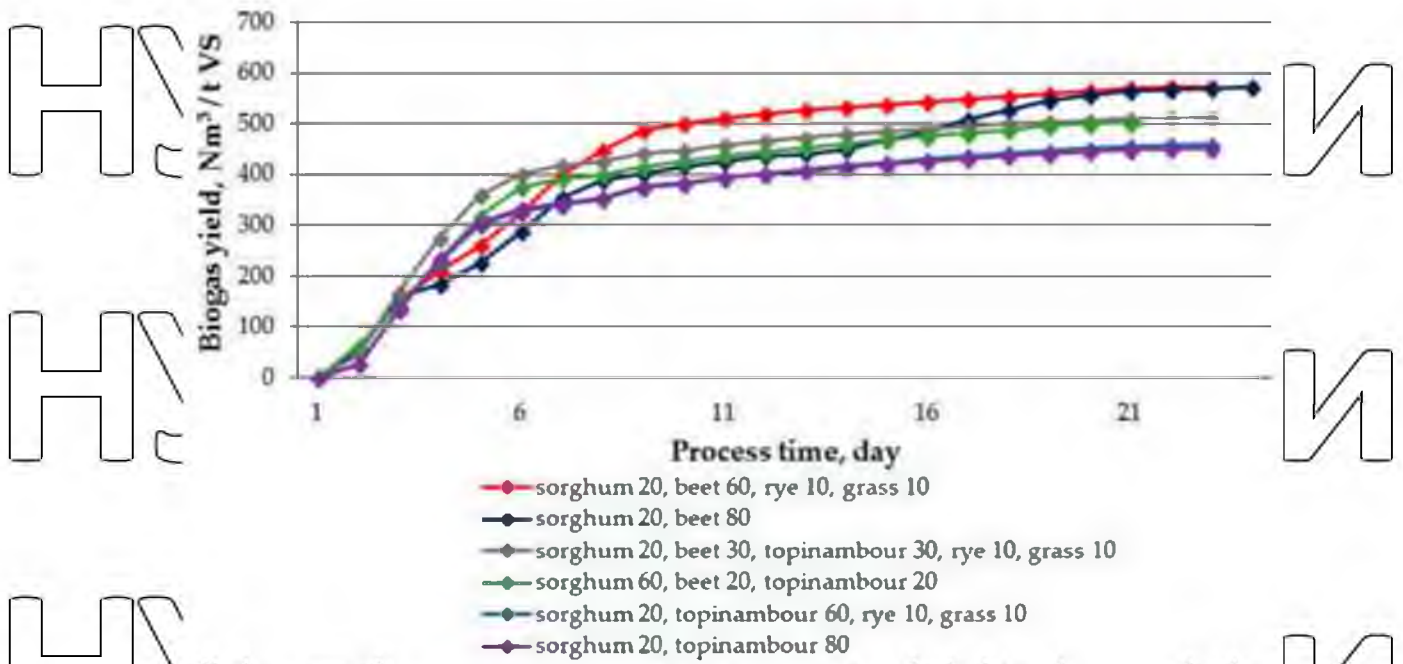


Рисунок 1. Вихід біогазу з ксубстратів на основі сорго.

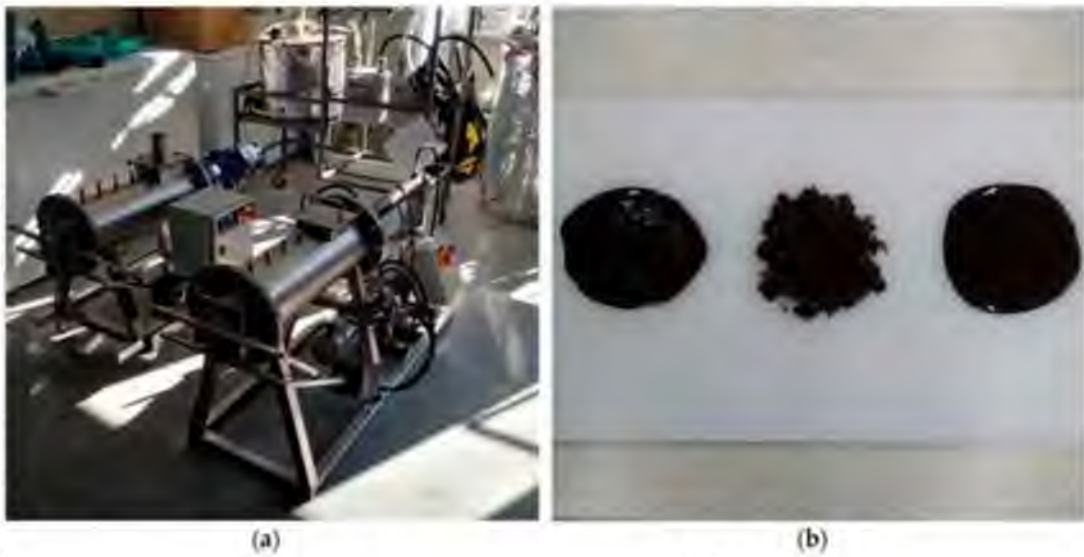


Рисунок 2. Два сепаратори (а) і три форми дигестату: рідкий дигестат, тверда фракція, ефлюент (б).

Таблиця 1. Вихід біогазу для аналізованої суміші субстратів, VS, співвідношення C/N і вибрані параметри

Суміш субстратів	Вихід біогазу	VS	C	N	C/N	P	K
Сорго 20% + топинамбур 80%	445,96 ± 35,3	74,41 ± 0,2	26,43 ± 0,12	9,68 ± 0,4	2,73 ± 0,1	1,15 ± 0,1	5,11 ± 0,3

Сорго 20% + топінамбур 60% + жито 10% + трави 10%	453,60 ± 24,6	74,62 ± 0,2	26,47 ± 0,15	9,68 ± 0,12	2,73	1,16 ± 0,12	5,03 ± 0,2
Сорго 60% + буряк 20% + топінамбур 20%	498,32 ± 26,9	74,57 ± 0,1	26,46 ± 0,09	9,67 ± 0,15	2,74	1,16 ± 0,21	4,72 ± 0,4
Сорго 20% + буряк 30% + топінамбур 30% + жито 10% + трава 10%	506,53 ± 21,3	74,52 ± 0,1	26,41 ± 0,21	9,67 ± 0,09	2,73	1,15 ± 0,15	4,80 ± 0,12
Сорго 20% + буряк 80%	592,18 ± 35,7	74,63 ± 0,2	26,43 ± 0,16	9,66 ± 0,18	2,74	1,15 ± 0,12	4,56 ± 0,23
Сорго 20% + буряк 60% + жито 10% + трави 10%	593,00 ± 32,8	74,60 ± 0,1	26,41 ± 0,18	9,66 ± 0,20	2,73	1,15 ± 0,24	4,60 ± 0,17

Таблиця 2. Підсумок множинної регресії для залежної змінної QB від VS та C/N.

Параметр/Статистика	Коефіцієнт					
	b *	станд. Помилка з b *	b	станд. Помилка з b	t(15)	стор
Вільне самовираження			14,83 894	5,219134	2,843 18	0,012 335
VS	1,841 40	0,261594	2,469 14	0,350773	7,039 13	0,000 004
C/N	-1,43 288	0,261594	-1,97 016	0,359684	-5,47 747	0,000 064

Тверду фракцію подрібнювали до 3 мм і попередньо висушували до загального вмісту твердої речовини близько 24% (рис. 3).



Рисунок 3. Тверда фракція дигестату, фрагментована до 3 мм — складова гранул.

Для опису кінетики анаеробного зброджування в процесі перевірених партій було використано кінетичне рівняння (1) моделі Табасарани першого порядку [32]:

$$G_t = G_0 \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)), \text{ Нм}^3 / \text{т VS} \quad (1)$$

де G_t – кумулятивний об'єм біогазу, отриманого наприкінці процесу, $\text{Нм}^3 / \text{т VS}$; G_0 – кінетичне виробництво біогазу з одиниці партії $\text{Нм}^3 / \text{т VS}$; k – константа швидкості, $1 / \text{добу}$; t – тривалість анаеробного зброджування, добу .

Моделювання проводилося для кожного випробування шляхом ітерації початкових параметрів. Щоб перевірити ступінь відповідності моделі результатам експерименту, було визначено R^2 (Коефіцієнт детермінації узгодження моделі з даними) та RSME (Середньоквадратична помилка), який оцінювався за формулою (2):

$$RMS(S) = \sqrt{1/n \sum p = 1n(t(p) - y(p))^2} \quad (2)$$

де $t_{i(p)}$ і $y_{i(p)}$ — виміряні та обчислені значення вихідного вектора, а i — номер вимірювання. Крім того, для визначених констант швидкості на основі залежності (3):

$$T_{1/2} = \ln 2 / k, d \quad (3)$$

було розраховано деградацію періодів напіврозпаду окремих серій [33]. Параметри та коефіцієнти моделі Табасарана наведені в таблиці 1.

Статистичний аналіз коефіцієнта детермінації R^2 і середньоквадратичної похибки RSME показав, що застосована модель, яка описує процес виробництва біогазу, добре підходить до експериментальних даних для аналізованої партії (табл. 3). Значення коефіцієнтів детермінації R^2 та RMSE для обраної партії становили відповідно: 0,985 та 20,96. Кінетичне виробництво біогазу для обраної партії, визначене за рівнянням першого порядку, було найвищим серед усієї суміші косубстратів і досягло значення 593 $\text{Nm}^3/\text{t VS}$ (нормальні кубічні метри на тонну легких твердих речовин). Найменше біогазу утворилося із партії, що складалася з 20% сорго та 80% топінамбуру — 456 $\text{Nm}^3/\text{t VS}$. Модельна константа швидкості k становила 0,175, а період напіврозпаду $T_{1/2}$ — 2,44 дня. Для окремих субстратів найбільший вихід біогазу формувався з бурякового силосу, найменший — з силосу з сорго та топінамбуру відповідно: 490 і 414 $\text{Nm}^3/\text{t VS}$. Значення постійної швидкості (k) для косубстратів були між 0,130 і

0,257. Для окремих субстратів значення k коливалися від 0,124 до 0,223. Однак значення періоду напіврозпаду та тривалості процесу для всіх ко-субстратів та окремих субстратів були дуже подібними. Решта коефіцієнтів для окремих субстратів були аналогічними коефіцієнтам для обраної партії. Значно вищим був лише коефіцієнт RMSE для бурякового силосу — 40,96, а для сорго — найменший — 11,55. Отримані параметри кінетики процесу для шихти на основі сорго є сприятливими. Однак ці параметри є нижчими значеннями, ніж отримані для окремих субстратів: кукурудзяного силосу та бурякового жому. Виробництво біогазу у цьому випадку для кукурудзяного силосу та бурякового жому було вищим і становило 677 та 649 $\text{Нм}^3/\text{т VS}$. Константа швидкості реакції становила відповідно: 0,173 і 0,318, періоди напіврозпаду — 2,449 і 1,840 і коефіцієнт детермінації — 0,990 і 0,994. З іншого боку, значення коефіцієнта RMSE були нижчими (18,09 та 12,5).

Таблиця 3. Кінетичні параметри виробництва біогазу з обраної партії

Суміш субстратів	Ефективність біогазу G_0 , $\text{Нм}^3/\text{т VS}$	Константа швидкості k , 1/день	Періоди напіврозпаду $T_{1/2}$, день	Коефіцієнт детермінації R^2	Середньоквадратична помилка, RMSE	Тривалість процесу t , день
Сорго 20% + Буряк 60% + Жито 10% + Трави 10%	593,00	0,175	2,44	0,985	20,96	23
Сорго 20% + Буряк 80%	592,18	0,130	2,73	0,986	18,96	22
Сорго 20% + Буряк 30% +	506,53	0,257	2,05	0,980	20,29	22

Топін амбур 30% + Жито 10% + Трава 10%							
Сорго 20% + Топін амбур 80%	445,96	0,231	2.16	0,978	19,03	22	
Сорго 20% + Топін амбур 60% + Жито 10% + Трава 10%	453,60	0,219	2.21	0,980	18.46	22	
Сорго 60% + Буряк 20% + Топін амбур 20%	498,32	0,224	2.19	0,985	17,82	20	
Буряк овий силос	744,51	0,223	2.19	0,965	40,96	22	
Житні й силос	582,14	0,124	2.78	0,994	13.04	27	
Трав'я ний силос	517,08	0,179	2.41	0,973	25.13	24	
Силос із сорго	489,99	0,197	2.32	0,992	11.55	28	
Силос топіна мбур	414,48	0,214	2.24	0,979	17,02	24	

Окрім виходу біогазу, також вивчався склад виробництва біогазу. Після стабілізації процесу безперервного анаеробного зброджування для обраної партії, що складається з чотирьох субстратів, середній вміст метану становив: 54,2%; вуглекислий газ: 45,0%. Крім того, також було виміряно вміст слідів сполук, середній вміст кисню в біогазі становив: 0,6%; аміак: 10,5 ppm, сірководень: 46,5 ppm. Перед початком анаеробного зброджування проводили фізико-хімічні аналізи чотирьох субстратів, інокулята та партії (табл. 4). Ці дослідження були спрямовані на виключення аномалій під час процесу анаеробного зброджування. Найвищим загальним вмістом сухої речовини (TS) характеризувались: жито та сорго, а найменшим: партія та інокулят відповідно 38,4; 29,4; 6,0 і 5,5%. З іншого боку, буряк і сорго мали найвищий вміст летких речовин (95,7 і 94,9% TS). У цьому випадку також партія та інокулят мали найнижчий параметр (76,2 та 74,2% TS). pH був лужним для жита, партії та інокулята, для решти субстратів pH був кислим. Інокулят характеризувався найвищим вмістом азоту (9,84% TS), а партія мала найбільший вміст решти елементів з аміачним азотом порівняно з іншими субстратами та інокулятом.

Таблиця 4. Фізико-хімічний аналіз: партії, інокулята та вибраних субстратів, використаних у процесі анаеробного зброджування...

Марк	одиниця	партія	сорго	Буряк	Трава	Жито	Інокулят
TS	%	6,0 ± 0,1	29,4 ± 0,1	23,3 ± 0,1	25,9 ± 0,2	38,4 ± 0,2	5,5 ± 0,2
VS	% TS	76,2 ± 0,1	94,9 ± 0,1	95,7 ± 0,2	85,9 ± 0,1	93,5 ± 0,1	74,2 ± 0,1
Сира зола	%	1,42 ± 0,1	1,50 ± 0,1	0,73 ± 0,1	3,57 ± 0,1	2,51 ± 0,1	1,41 ± 0,1
pH	-	8,4 ± 0,1	4,6 ± 0,1	4,7 ± 0,1	5,1 ± 0,1	7,6 ± 0,1	8,6 ± 0,1
N	% TS	8,6 ± 0,2	1,1 ± 0,3	0,70 ± 0,1	2,2 ± 0,1	1,0 ± 0,1	9,84 ± 0,2
P	г/кг TS	10,0 ± 0,3	3,8 ± 0,2	1,0 ± 0,2	3,4 ± 0,2	1,2 ± 0,2	11,4 ± 0,2

P-PO4	г/кг TS	3,5 ± 0,3	1,7 ± 0,3	0,60 ± 0,3	2,7 ± 0,6	0,40 ± 0,2	3,6 ± 0,4
K	г/кг TS	42,7 ± 0,4	8,9 ± 0,4	5,80 ± 0,1	23,9 ± 0,3	8,5 ± 0,2	45,2 ± 0,6
Ca	г/кг TS	28,4 ± 0,8	3,0 ± 0,2	1,30 ± 0,1	11,0 ± 0,5	3,2 ± 0,30	28,8 ± 0,2
Na	г/кг TS	9,1 ± 0,4	0,10 ± 0,05	0,30 ± 0,10	0,10 ± 0,05	0,10 ± 0,05	9,5 ± 0,1
Азот аміачний	г/кг TS	44,6 ± 0,8	2,5 ± 0,2	0,20 ± 0,1	3,0 ± 0,1	1,8 ± 0,3	49,0 ± 0,7

Після процесу анаеробного зброджування було проведено подальші фізико-хімічні аналізи дигестату, твердої фракції та стоків, що утворюються в результаті відділення дигестату (Таблиця 5). Технологія гранулювання передбачає подрібнення твердої фракції до 3 мм і її висушування, щоб загальна маса була вище 20%. Загальний вміст твердих та летких твердих речовин у твердій фракції після подрібнення та сушіння склали відповідно: 20,7% та 91,7%. Рідкий дигестат мав трохи вищі значення загального вмісту твердих речовин і летких твердих речовин у порівнянні зі стійним потоком. Тверда фракція до подрібнення та після дроблення незначно відрізнялася одна від одної за окремими параметрами. Тверда фракція після подрібнювача та стічних вод містила найменшу кількість азоту, фосфору та калію порівняно з іншими тестованими формами дигестату. Тому для отримання відповідних пропорцій елементів у гранульованому добриві необхідно збільшити частку цих елементів.

Таблиця 5. Фізико-хімічні аналізи: дигестату, твердої фракції та стоків.

Марк	одина	Дигес	Тверда	Тверда	Стоки	Тверда
	ця	тат	фракція	фракція		фракція
			перед	після		після
			подрібнюв	подрібню		подрібне
			ачем	вача		ння та
						сушіння
TS	%	5,9 ± 0,1	19,4 ± 0,1	18,0 ± 0,1	5,3 ± 0,1	20,7 ± 0,2

VS	% TS	76,9 ± 0,1	90,4 ± 0,1	90,8 ± 0,1	73,8 ± 0,1	91,7 ± 0,1
Сира зола	%	1,37 ± 0,10	1,86 ± 0,1	1,66 ± 0,1	1,37 ± 0,1	1,98 ± 0,1
pH	-	8,8 ± 0,1	9,1 ± 0,1	9,4 ± 0,1	8,7 ± 0,1	9,3 ± 0,1
N	% TS	7,84 ± 0,10	2,47 ± 0,10	2,39 ± 0,2	8,64 ± 0,10	2,12 ± 0,10
P	г/кг TS	9,3 ± 0,1	4,8 ± 0,1	3,9 ± 0,1	9,3 ± 0,4	9,3 ± 0,5
P-PO ₄	г/кг TS	1,8 ± 0,3	1,1 ± 0,2	1,2 ± 0,2	10,5 ± 0,2	4,3 ± 0,1
K	г/кг TS	94,6 ± 0,3	28,9 ± 0,2	32,1 ± 0,2	106,7 ± 0,4	22,8 ± 0,2
Ca	г/кг TS	93,6 ± 0,6	40,0 ± 0,7	39,6 ± 0,5	101,5 ± 0,5	9,3 ± 0,40
Na	г/кг TS	9,9 ± 0,1	3,0 ± 0,1	3,5 ± 0,1	11,2 ± 0,1	2,7 ± 0,2
Азот аміачний	г/кг TS	40,4 ± 0,2	7,4 ± 0,1	6,8 ± 0,2	39,0 ± 0,2	6,8 ± 0,1
селітра	г/л				1,02 ± 0,3	
Нітрит	г/л				0,05 ± 0,01	
Фосфати	г/л	1,8 ± 0,4	1,1 ± 0,3	1,2 ± 0,3	2,5 ± 0,2	1,3 ± 0,3
Хлориди	г/л				0,98 ± 0,22	
Підвіска	г/л				10,5 ± 1,8	
Ступінь зволоження біомаси	%		80,6 ± 0,2	82 ± 0,1		79,3 ± 0,2
Ступінь відділення TS від стоків	%		94,59 ± 0,20	94,17 ± 0,20		94,93 ± 0,20
Зневоднення дигестату	хвилини					
Загальна кислотність	ммоль/л					

Окислюв ність	г/л O ₂				16,4 ± 3,6
Помутнін ня	NTU				22700 ± 850
Карбонова твердість	г CaCO ₃ /л				5,2 ± 0,8
Провідніст ь	мСм/с м ²				31,6 ± 2,3
Колір	-				темно- коричне вий
білок	%				54 ± 0,7

Дослідження виробництва гранул проходили поетапно. Параметри гранульованого добрива, отримані для двох зразків (табл. 6), не задовільні за вмістом поживних елементів і суттєво відрізнялися від прийнятого співвідношення N:P:K:Mg:S – 2:4:1,4:1,8.

Таблиця 6. Вибрані фізико-хімічні аналізи отриманого грануляту.

Гранулят	TS	N	P	K	Mg	S	pH	реактивність
	%							% TS
Без	67,1	0,60	0,20	1,22	0,68	0,076	12,2	72
поживних	±	±	±	±	±	±	±	±
речовин	0,1	0,03	0,02	0,06	0,01	0,002	0,1	
з	92,3	4,10	4,20	11,0	7,3	0,913	12,4	84
поживними	±	±	±	±	±	±	±	±
речовинами	0,1	0,20	0,13	0,20	0,11	0,006	0,1	

У поточній ситуації необхідно було зробити подальші спроби отримати додаткові гранули із задовільним складом та ефективним впливом на рослини в експериментах із удобренням. Було виявлено, що кількість доданого кальцію під час процесу гранулювання не може бути значно зменшена через значне зниження температури процесу і, таким чином, погіршення довговічності гранул. Під час гранулювання необхідно збільшити кількість доданих мінеральних поживних речовин (переважно азоту), що суперечить початковим

припущенням. Підвищене додавання мінеральних поживних речовин під час процесу гранулювання також викликає велику проблему, оскільки відбуваються великі втрати головним чином азоту. Як наслідок, це викликає труднощі у підтриманні стабільного рівня вмісту та складу N:P:K:Mg:S у грануляті. Тому необхідно збільшити вміст поживних речовин у гранулах, щоб в 1 т гранульованого добрива було мінімум 50 кг N, 90 кг P і 120 кг K. Ці значення продиктовані стандартними вимогами рослин до поживних речовин, проте максимальна доза азоту 170 кг/га може бути досягнута за декілька прийомів. Нарешті, було показано, що єдиним параметром, який може контролювати та змінювати властивості грануляту, є мінеральний вміст поживних речовин. Як джерело азоту, що поповнює його можливу відсутність у твердій фракції дигестату, використовували сечовину (NH_2CONH_2), за відсутності фосфору цей елемент доповнювали моноамонійфосфатом ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). Для поповнення нестачі калію, магнію та сірки у твердій фракції відповідно: гідрофосфат калію (KH_2PO_4), нітрат магнію ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$), тіосульфат натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), використовується.

Гранульоване добриво було виготовлено з вмістом: N 5% TS, P 9% TS та K 12% TS, тому в 1 тонні добрива було б 50 кг N, 90 кг P і 120 кг K. Це означає значне збільшення у відсотках N, P, K, Mg, S у грануляті добрива, що відрізняється від початкової ідеї мінімального додавання поживних речовин до грануляту (табл. 7). Встановлено, що на початку експериментів з удобренням рослини отримують стартову дозу добрива в мінеральній формі. Також були отримані органо-мінеральні гранули, які відразу ж висівали у вазі. Ці гранули, за припущеннями, повільно виділяють поживні речовини в ґрунтовий розчин (рис. 4).



Малюнок 4. Гранульоване добриво.

Таблиця 7. Вибрані фізико-хімічні аналізи отриманого грануляту.

Гранулят	TS	N	P	K	Mg	S	pH	реактивність
	%							% TS
>6 мм	87,9 ±0,1	3,91 ±	8,68 ±	11,6 ±	11,4 ±	0,015 ±	12,6 ±0,1	112
6 мм	92,0 ±0,2	0,02	0,05	0,25	0,14	0,001	13,0 ±0,1	109
		3,93 ±	6,13 ±	11,5 ±	8,08 ±	0,017 ±		
6 мм	88,6 ±0,2	0,04	0,05	0,10	0,21	0,009	13,0 ±0,1	96
		3,30 ±	6,43 ±	10,2 ±	8,32 ±	0,022 ±		
		0,06	0,10	0,10	0,12	0,011		

3.2. Правомірність переробки дигестату в гранули добрив

для біогазових установок потужністю 1 МВт

Наведені нижче розрахунки демонструють законність переробки дигестату з біогазової установки потужністю 1 МВт у гранульоване добриво. На цій біогазовій установці використовується парія, яка складається з: сорго, буряка, жита та трави у відсотках, які використовуються для дослідження кінетики анаеробного зброджування. Крім того, скільки біогазу розраховується на день і протягом року, створеного в цьому прикладі сільськогосподарської біогазової установки. Основні параметри для

розрахунків наведені в таблиці 8. При цих значеннях потужність біогазової установки становить 1 МВт, сумарно на добу в камерне зброджування має надходити 80,8 т/добу всіх чотирьох субстратів. Якщо 90% партії, яка використовується для постачання біогазової установки, щодня надходить у камеру дигестату, то кількість дигестату становить: 72,7 т/добу. Річне виробництво дигестату для цієї зразкової біогазової установки становить 26 550 т/рік. Якщо ви хочете використовувати рідкий дигестат як добриво, ви повинні володіти сотнями гектарів поля з такою кількістю. Часто це неможливо, особливо коли біогазова установка належить підприємству харчової промисловості, яке зазвичай не має власної орної землі. Тому слід шукати інші способи переробки дигестату, щоб його було легше вносити в поле і щоб його було менше протягом року. Якщо дигестат містить 5% TS, враховуючи реакцію води з кальцієм і припускаючи, що додавання кальцію дорівнює кількості TS і використовуючи близько 20% добавок, що містять N, P, K, Mg, S, можна виробляють 3613 т/рік добрив. Орієнтовна вартість виробництва однієї тонни гранульованого добрива становить від 90 до 110 євро, тоді як орієнтовна ціна добрива становить приблизно від 180 до 225 євро. Середній річний прибуток для прикладу біогазової електростанції з використанням методу може становити 366 000 євро, тоді як вартість встановлення методу на біогазовому заводі потужністю 1 МВт становить приблизно 790 000 – 900 000 євро.

Таблиця 8. Основні параметри субстратів у прикладі сільськогосподарської біогазової установки.

Підкладка	Відсоток	Кількість субстрату	Загальна твердість	Летюча тверда речовина	Вихід метану
	%	т/рік	%	% TS	Нм ³ /т VS
Сорго	20	5900	29.9	94.1	320
Буряк	60	17 700	16.2	93.7	462
Жито	10	2950	60.6	92.6	296
Трава	10	2950	20.2	76.1	298

ВИСНОВКИ

Чудовим прикладом відповідної форми дигестату є цінне органіко-мінеральне гранульоване добриво. Завдяки використанню дигестату з біогазової установки та його добривним властивостям виробництво біогазу є безвідходним і не має запаху. Крім того, ґрунт збагачується органічною частиною твердої фракції дигестату, що міститься в грануляті (покращення ґрунтових умов за рахунок зменшення дефіциту гумусу в ґрунті). Кальцій, що міститься в грануляті, має розкислюючу дію на ґрунт, що покращує властивості ґрунту за рахунок зменшення дефіциту кальцію в підкисленому ґрунті. Ще однією перевагою використання гранул є збагачення ґрунту біогенними елементами, необхідними для вегетації рослин, що містяться в грануляті (у твердій фракції дигестату + мінеральна добавка) та зменшення використання мінеральних добрив. Отриманий гранулят стерильний і гідрофобний, що зменшує проблему евтрофікації води. Крім того, добриво може бути в 2-3 рази дешевше для фермера, ніж добриво, виготовлене промисловим способом. Однак існують і труднощі, пов'язані з процесом гранулювання. Гідрофобний гранулят показав низьку реакційну здатність/розчинність, через що поживні речовини надто повільно вивільнялися з грануляту в ґрунт під час експериментів із удобренням, що негативно впливало на ріст рослин. Тому необхідно було змінити концепцію грануляту добрива на менш гідрофобний, з більшою реакційною здатністю та доступністю для рослин. Необхідно було збільшити відсоток мінеральних добавок (біогенних елементів) і внести стартову дозу азоту на початку вегетації рослин. Фактором, що обмежує кількість гранульованого добрива на гектар, є його високий вміст кальцію близько 50%, допустима доза кальцію – $4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. При виробництві гранульованого добрива спостерігаються великі втрати азоту у вигляді окислення аміачного азоту. Крім того, на початку досліджень у процесі гранулювання існувала проблема підтримки постійного повторюваного рівня біогенних елементів N, P, K, Mg, S у наступних реплікаціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Добривна альтернатива / В. Б. Дихонвор. – Верно – № 3, 2008. С. 62-72.
2. Вовкотруб М.П. Виробництво мінеральних та органічних мінеральних добрив / Вовкотруб М.П., Мулярчук І.Ф., Городній М.М. // Науковий вісник НАУ.
3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. Аналітична записка БАУ №7. – 25.02.2014 р. – С. – 33
4. Аналіз стану виробництва продукції тваринництва в Україні. 26.12.2021. URL: http://www.economy.nauka.com.ua/pdf/12_2021/107.pdf
5. Біогазові проекти в Україні 2020. Інфографіка - SAF Україна. SAF Україна. URL: <https://saf.org.ua/news/1042/>
6. Біоенергетичні об'єкти: інфографіка - UABIO. UABIO. URL: <https://uabio.org/materials/11862/>
7. Як сталі біогазові технології сприяють оздоровленню ґрунтів та екосистем? – 3 аргументи до Всесвітнього дня ґрунтів - UABIO. UABIO URL: <https://uabio.org/news/9351/>
8. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> Статистичний щорічник України 2020
9. Статистичний щорічник України 2020 Державна служба статистики України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/
10. Компостування: ефективно, екологічно, корисно для ґрунтів. 12.06.2017. URL: <https://superagronom.com/blog/115-kompostuvannya-efektivno-ekologichno-korisno-dlya-gruntiv>
11. Карпенко В.І. Отримання високоякісних добрив та біогазу з відходів тваринництва / Карпенко В.І., Маслич Б.К. // Україна: людина, суспільство, природа: міжнародна наукова студентська

конференція: тези доп. – К.: ВД "Києво-Могилянська академія",
1995. – С. 7.

12. Erdal, G.; Esengün, K.; Erdal, H.; Gündüz, O. Energy use and economical analysis of sugar beet production in Tokat province of Turkey. *Energy* 2007, 32, 35–41.

13. Bratina, B.; Šorgo, A.; Kramberger, J.; Ajdnik, U.; Zemljč, L.F.; Ekart, J.; Šafarič, R. From municipal/industrial wastewater sludge and FOG to fertilizer: A proposal for economic sustainable sludge management. *J. Environ. Manag.* **2016**, 183, 1009–1025.

14. Uysal, A.; Demir, S.; Sayilgan, E.; Eraslan, F.; Kucukyumuk, Z. Optimization of struvite fertilizer formation from baker's yeast wastewater: Growth and nutrition of maize and tomato plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014, 21, 3264–3274.

15. Yetilmezsoy, K.; Ilhan, F.; Kocak, E.; Akbin, H.M. Feasibility of struvite recovery process for fertilizer industry: A study of financial and economic analysis. *J. Clean. Prod.* 2017, 152, 88–102.

16. Eriksson, O.; Bisailon, M.; Haraldsson, M.; Sundberg, J. Enhancement of biogas production from food waste and sewage sludge – environmental and economic life cycle performance. *J. Environ. Manag.* 2016, 175, 33–39.

17. Jilani, G.; Akram, A.; Ali, R.M.; Hafeez, F.Y.; Shamsi, J.H.; Chaudhry, A.N.; Chaudhry, A.G. Enhancing crop growth, nutrients availability, economics and beneficial rhizosphere microflora through organic and biofertilizers. *Ann. Microbiol.* 2007, 57, 177–184.

18. Shen, Z.; Ruan, Y.; Wang, B.; Zhong, S.; Su, L.; Li, R.; Shen, Q. Effect of biofertilizer for suppressing Fusarium wilt disease of banana as well as enhancing microbial and chemical properties of soil under greenhouse trial. *Appl. Soil Ecol.* 2015, 93, 111–119.

19. Jara-Samaniego, J.; Perez-Murcia, M.; Bustamante, M.; Pérez-Espínosa, A.; Paredes, C.; López, M.; López-Lluich, D.; Gavilanes-

Terán, I.; Moral, R. Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *J. Clean. Prod.* 2017, 141, 1349–1358.

20. Tiwari, P.; Prakash, A.; Adholeya, A. Commercialization of arbuscular mycorrhizal biofertilizer. *Fungal Biotechnol. Agric. Food Environ. Appl.* 2003, 21, 195–204.

21. Seghetta, M.; Hou, X.; Bastianoni, S.; Bjerre, A.-B.; Thomsen, M. Life cycle assessment of macroalgal biorefinery for the production of ethanol, proteins and fertilizers—A step towards a regenerative bioeconomy. *J. Clean. Prod.* 2016, 137, 1158–1169.

22. Lalevic, B.; Sivcev, B.; Raicevic, V.; Vasic, Z.R.; Petrovic, N.; Milinkovic, M. Environmental impact of viticulture: Biofertilizer influence on pruning and wine waste. *Bulg. J. Agric. Sci.* 2013, 19, 1027–1032.

23. Forte, A.; Fagnano, M.; Fierro, A. Potential role of compost and green manure amendment to mitigate soil GHGs emissions in Mediterranean drip irrigated maize production systems. *J. Environ. Manag.* 2017, 192, 68–78.

24. Martínez-Blanco, J.; Colón, J.; Gabarrell, X.; Font, X.; Sánchez, A.; Artola, A.; Rieradevall, J. The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. *Waste Manag.* 2010, 30, 983–994. [Google Scholar] [CrossRef]

25. Yodkhum, S.; Gheewala, S.H.; Sampattagul, S. Life cycle GHG evaluation of organic rice production in northern Thailand. *J. Environ. Manag.* 2017, 196, 217–223. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

26. Bhardwaj, D.; Ansari, M.W.; Sahoo, R.K.; Tuteja, N. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microb. Cell. Fact.* 2014, 13, 66.

27. Li, R.; Tao, R.; Ling, N.; Chu, G. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field. Implications for soil biological quality. *Soil Tillage Res.* 2017, 167, 30–38.

28. Redding, M.; Lewis, R.; Kearton, T.; Smith, O. Manure and sorbent fertilisers increase on-going nutrient availability relative to conventional fertilisers. *Sci. Total Environ.* 2016, 569, 927–936.

29. Adegnehu, G.; Nelson, P.N.; Bird, M.I. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia. *Sci. Total Environ.* 2016, 569, 869–879.

30. Техислoгiя бiовиробництва (на основi бiотехнологiї): навчальний посiбник / М. М. Лiсовий, В. С. Таргоня, Т. В. Клименко – Житомир, 2018.-240 с.

31. Компoстyвання: ефективно, екологiчно, корисно для ґрунтiв. 12.06.2017. URL: <https://superagronom.com/blog/15-kompostuvannvaeftivno-ekologichno-korisno-dlya-gruntiv>

32. Laval, A.A.; Dzivama, A.U.; Wasinda, M.K. Effect of inoculum to substrate ratio on biogas production of sheep paunch manure. *Res. Agric. Eng.* 2016, 62, 8–14.

33. Hoeks, J. Significance of biogas production in waste tips. *Waste Manag. Res.* 1983, 1, 323–335.