



Проект «Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро-харчових та інших малих та середніх підприємствах (МСП) України»



Серія навчально-методичних матеріалів

Модуль

БІОГАЗ

Автори: д.т.н., проф. **Голуб Г.А.**

д.т.н., проф. **Дубровін В.О.**

к.т.н., доцент **Поліщук В.М.**,
к.т.н., доцент **Сера К.М.**, к.т.н., доцент **Марус О.А.**,
к.т.н., доцент **Драгнєв С.В.**, **Сидорчук О.В.**,
к.т.н. **Павленко М.Ю.**, к.т.н. **Чуба В.В.**, д.т.н., доцент
Кухарець С.М.

Редактор серії к.б.н. **Щербак С.Д.**

Публікацію підготовлено та видано в рамках виконання проекту «Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро-харчових та інших малих та середніх підприємствах (МСП) України», що виконується Агенством ООН з питань промислового розвитку (ЮНІДО) за підтримки Глобального Екологічного Фонду (ГЕФ).

Зміст публікації не є відображенням офіційної позиції ЮНІДО або ГЕФ

Не для комерційного використання

Київ 2015

© ЮНІДО 2015

УДК [631.371] [620.92]

Голуб Геннадій Анатолійович, **Дубровін Валерій Олександрович,**

Поліщук Віктор Миколайович, Сєра Катерина Михайлівна, Драгнєв Семен Васильович, Марус Олег Анатолійович, Сидорчук Ольга Валеріївна, Павленко Максим Юрійович, Чуба В'ячеслав Володимирович, Кухарець Савелій Миколайович

БИОГАЗ

Розглянутий спосіб переробки відходів методом анаеробного зброджування. Проведений огляд сировини для виробництва біогазу. Розглянуті мікробіологічні основи процесу метаноутворення. Проведений аналіз способів завантаження сировини в метантенк. Розглянуті фактори, що впливають на ефективність виробництва біогазу. Проаналізовані технології та технічні засоби виробництва біогазу. Наведена економічна ефективність функціонування біогазової установки. Описана конструкція і принцип роботи лабораторної біогазової установки в Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

*Golub G.A., **Dubrovin V.O.,** Polishuk V.M., Syera K.M., Dragnev S.V., Marus O.A., Sydorчук O.V., Pavlenko M.Y., Chuba V.V., Kuhkarez S.M.*

BIOGAS

The text is concerned with the methods and possibilities of biogas production. Much attention is given to the raw materials and microbiological processes of anaerobic digestion for waste recycling to get methane. It gives a detailed analysis of technologies and equipments for biogas production, describes methods of downloading materials in digesters and factors influencing the technological effectiveness. The cost and economical efficiency were analyzed in conditions of agricultural enterprises. Authors also describe the construction and basic work principle of biogas equipments which is used at the research laboratory of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

Рецензенти:

Войтюк В.Д. – доктор технічних наук, професор, директор НДІ техніки, енергетики та інформатизації АПК;

Ловейкін В. С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструювання машин і обладнання.

Рекомендовано до друку вченою радою Механіко-технологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол №6 від 10.02.2015 р.)

ЗМІСТ

Вступ	5
1. Сировина для виробництва біогазу	6
2. Мікробіологічні основи процесу метаноутворення	6
3. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок	10
4. Аналіз метаноутворення в біогазових установках	17
5. Кінетика зброджування органічної маси в біогазових установках	23
6. Конструкційно-технологічна схема біогазової установки з модульним біореактором та конструкція експериментальної біогазової установки з обертовим реактором	26
7. Способи завантаження субстрату в метантенк	30
8. Вплив косубстратів на вихід біогазу	33
9. Вплив виду субстрату та його перемішування на вихід біогазу	35
10. Собівартість виробництва біогазу в умовах сільськогосподарських підприємств	36
11. Лабораторна біогазова установка	41
Контрольні питання	43
Список використаних джерел	45

АВТОРИ



Дубровін В.О.
д.т.н., професор



Голуб Г.А.
д.т.н., професор



Полішук В.М.
к.т.н., доцент



Сєра К.М.
к.т.н., доцент



Драгнєв С.В.
к.т.н., доцент



Сидорчук О.В.
к.т.н.



Марус О.А.
к.т.н., доцент



Павленко М.Ю.
к.т.н.



Чуба В.В.
к.т.н.



Кухарець С.М.
к.т.н., доцент



ВСТУП

У зв'язку з прогнозованим вичерпанням основних видобувних енергоносіїв у найближчі 40-50 років, енергія з відновлювальних ресурсів є однією з найбільш обговорюваних тем в Європі та в усьому світі. Величезні викиди вуглекислого газу і метану в атмосферу призводять до збільшення парникового ефекту. Інвестиції в розвиток технологій одержання енергії з поновлюваних джерел, таких як енергія сонця, вітру, води, біомаси (органічні речовини тваринного або рослинного походження), або геотермальна енергія нині стає гострою необхідністю.

Насамперед проблема диверсифікації енергетичних джерел постає перед країнами-імпортерами видобувної паливної сировини, якою є й Україна. Вона не має в достатній кількості власних запасів паливно-енергетичних ресурсів і напряду залежить від імпортерів, які поставляють 75 % необхідного обсягу природного газу та 85 % нафти й нафтопродуктів і встановлюють рік у рік дедалі вищі ціни.

Значними споживачами паливно-енергетичних ресурсів є вітчизняні аграрні підприємства, тому перед ними постає об'єктивна необхідність впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій, орієнтованих на виробництво біологічних видів палива.

Виробництво біогазу є ефективною та інвестиційно привабливою технологією, що зумовлюється наявністю значного сировинного потенціалу, сприятливими природно-кліматичними умовами та низьким рівнем собівартості даного виду енергії.

Проте Україна перебуває на початковому етапі запровадження відновлюваних джерел енергії, недостатньо вивченими є науково-технічні та економічні проблеми виробництва і використання біогазу. Таким чином, вивчення іноземного досвіду щодо зазначених проблем і запровадження його в аграрних підприємствах України набуває особливої актуальності.

При відсутності перемішування біомаси в реакторі, через деякий час спостерігається розділення біомаси з утворенням шарів за рахунок різниці в щільності окремих мінеральних та органічних компонентах, а також за рахунок флотації частинок при газовиділенні. При цьому більша частина біомаси анаеробних бактерій знаходиться в нижній частині реактора, а органічна частина біомаси субстрату накопичується у верхній частині реактора. Наслідком цього є те, що зона контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату обмежена пограничним шаром вказаних частин реактора. Плаваюча кірка із твердих органічних речовин також блокує вихід біогазу. Сприяння контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату забезпечується за рахунок перемішування субстрату, однак при цьому інтенсивного перемішування слід уникати, оскільки це може призвести до припинення анаеробного зброджування за рахунок порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається за рахунок повільного обертання мішалок або їх роботи упродовж короткого часу [11].

При використанні проточних реакторів існує можливість того, що незначна частина



поданої в реактор свіжої біомаси зразу ж буде вивантажена із реактора. Найкраще це питання вирішується за рахунок подачі в реактор невеликих порцій субстрату декілька разів на день, а також використання декількох реакторів, що працюють, як паралельно так і послідовно.

Частина твердих мінеральних включень, які містяться в субстратах на основі гною, звільняється в процесі біологічного розкладу в реакторі. Мінеральний осад призводить до зменшення корисного об'єму реактора. Досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що уже зустрічаються реактори наполовину заповнені мінеральним осадом, який можливо видалити лише екскаватором після повної зупинки процесу зброджування.

Таким чином, удосконалення існуючих реакторів та їх правильна експлуатація забезпечують ефективне отримання біогазу та електроенергії на його основі.

1. СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Сировину, що піддається метановому бродінню, можна поділити на три категорії:

- сільськогосподарську: гноївка, гній, енергетичні культури, залишки біомаси тощо;
- промислову: крохмаль, відходи скотобоєнь, молочних і цукрових заводів, фармацевтичної, косметичної та паперової промисловості тощо;
- господарську: органічні відходи, комунальні стоки тощо.

Ферментаційний матеріал можна також розділити на основний (ферментація якого може протікати самостійно, без додавання інших речовин) та допоміжний. Основним ферментаційним матеріалом вважають гній, гноївку, молоду траву, а допоміжним – відходи від переробки фруктів, органічні відходи, залишки їжі, жири, м'яса, органічні продукти, що розкладаються природно (біологічним шляхом), господарські стоки тощо [34].

2. МІКРОБІОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ МЕТАНОУТВОРЕННЯ

Переробка сировини на метан відбувається в ході складних взаємодій у змішаних популяціях бактерій, що належать до групи археїв, відомих під загальною назвою метаногенів.

Процес розкладання біомаси метаногенами можна розділити на 4 етапи (рис. 1).

I етап. Аеробні гідролізні бактерії перебудовують високомолекулярні органічні субстанції (білок, вуглеводи, жири, целюлозу) за допомогою ферментів на низькомолекулярні з'єднання, такі як цукор, амінокислоти, жирні кислоти і воду. Ферменти, виділені гідролізними бактеріями, прикріплюються до зовнішньої стінки бактерій (так звані екзоферменти) і при цьому розщеплюють органічні складові субстрату на малі водорозчинні молекули. Полімери (багатомолекулярні утворення) перетворюються на одномери (окремі молекули). Цей процес,



що отримав назву гідроліз, проходить повільно і залежить від позаклітинних ферментів, таких як амілази, протеази, ліпази тощо. На процес впливає рівень рН (оптимальний - 4,5-6) і час перебування в резервуарі.

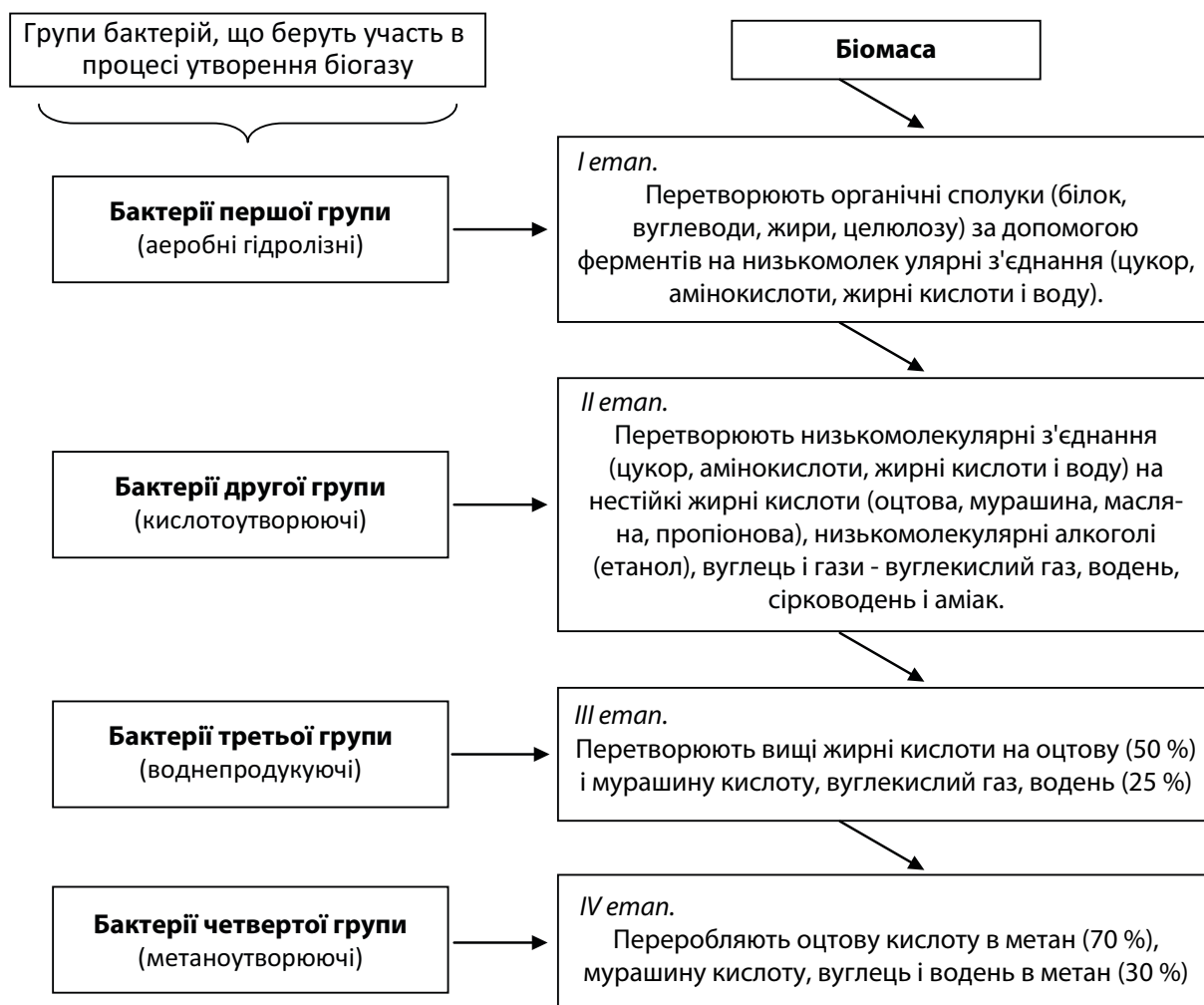


Рис. 1 Процес метанового бродіння [33]

II етап. Далі розщепленням займаються кислотоутворюючі бактерії. Окремі молекули проникають в клітини бактерій, де вони продовжують розкладатися. У цьому процесі частково беруть участь аеробні бактерії, що споживають залишки кисню, створюючи при цьому необхідні для метанових бактерій анаеробні умови. При рівні рН 6-7,5 виробляються в першу чергу нестійкі жирні кислоти (оцтова, мурашина, масляна, пропіонова), низькомолекулярні алкоголі (етанол), вуглець і гази - вуглекислий газ, водень, сірководень і аміак. Цей етап називають фазою окислення (рівень рН знижується).

III етап. Після цього воднепродукуючі бактерії з органічних жирних кислот створюють вихідні продукти для утворення метану: оцтову і мурашину кислоту, вуглекислий газ, водень. Такі бактерії, що знижують кількість вуглецю (в складі органічних кислот), є дуже чутливими до температури.

IV етап. На останньому етапі за допомогою метаноутворюючих бактерій з оцтової



і мурашиної кислоти, вуглецю і водню утворюється метан, вуглекислий газ і вода. 90 % всього метану виробляється на цьому етапі, причому 70 % метану утворюється з оцтової кислоти. Таким чином, утворення оцтової кислоти (тобто III етап і в меншій мірі II етап) є фактором, що визначає швидкість утворення метану. Метаноутворюючі бактерії виключно анаеробні.

В процесі розщеплення продукти переварювання (обміну речовин) кожної групи бактерій виступають живильними речовинами для наступної групи бактерій.

Розщеплення органіки на окремі складові і перетворення на метан може відбуватись лише у вологому середовищі, оскільки бактерії можуть переробляти лише речовини в розчиненому вигляді. Таким чином, для бродіння твердих субстратів існує потреба у додаванні води [33].

Пофазнерозщеплення органіки відбувається нерівномірно, адже різні групи бактерій працюють з різною швидкістю. Швидше за всіх працюють кислотоутворюючі бактерії, що розщеплюють органіку вже протягом часу від декількох годин до 2 днів. В ідеальному випадку між фазами розщеплення встановлюється динамічна рівновага в концентрації речовин, а саме: між подачею живильних речовин і їх розщепленням. Найчастішою помилкою є переогодовування бактерій субстратом, який швидко розщеплюється, що призводить до накопичення кислот в результаті дії кислотоутворюючих бактерій. У зв'язку з цим може наступити дуже різке падіння рівня рН, якого не витримають інші види бактерій. Крім того, надлишкова концентрація виробленої речовини призводить до затримки росту групи бактерій, що виробляють її.

Динамічна рівновага також визначається легкістю розщеплення субстрату. Цукор і крохмаль, наприклад, через свою просту структуру розщеплюються дуже швидко і вимагають лише короткого часу перебування у ферментаторі. Чим складніша структура субстрату, тим довше буде тривати розщеплення. Целюлоза і геміцелюлоза мають широко розгалужену структуру і розкладаються повільно. Лігнін (здерева'яніла речовина рослин), кількість якого збільшується з віком рослини, розкладається бактеріями дуже погано, оскільки він проявляє стійкість навіть до кислот.

Швидкість розщеплення субстратів має прямий вплив на технічно необхідний час для бродіння. Таким чином, вже при плануванні типу і конструкції біогазової установки варто чітко визначити, які субстрати використовуватимуться для бродіння.

Якщо ферментатор по-новому заповнити субстратом, то після проходження окремих фаз процесу розщеплення біогаз утворюється повільно. Кількість виробленого щодня біогазу зростає до того моменту, поки не буде досягнуто максимуму. В цей час субстрат, який легко розкладається, буде перероблений і бактеріям залишаться лише речовини, які важко переварювати. Таким чином, кількість газу, що виробляється щодня, знижуватиметься до тих пір, поки не буде розщеплений весь доступний матеріал або поки субстрат не можна буде розщеплювати далі. Це і є той момент, коли кількість виробленого газу настільки мала, що довгострокове перебування субстрату у ферментаторі більше недоцільне



з економічної точки зору. Тобто на практиці ніколи не буває повного розщеплення органіки.

Ефективний перебіг метанової ферментації органічних речовин потребує виконання чотирьох основних умов:

- безкисневої атмосфери;
- відповідної температури маси, що зброджується;
- слабо-лужної реакції середовища;
- присутності бактерій, що виробляють метан.

Виділення метану із речовини, що піддається ферментації, проходить лише в анаеробних умовах, тобто тоді, коли немає доступу кисню (повітря). Тому ферментація повинна протікати у спеціальних резервуарах, закритих ферментаційних камерах та іншому подібному обладнанні.

Дуже важливим фактором ефективного протікання процесу ферментації є температура маси, що зброджується. За оптимальною температурою життєдіяльності метаноутворюючі бактерії можна розділити на три групи (рис. 2).

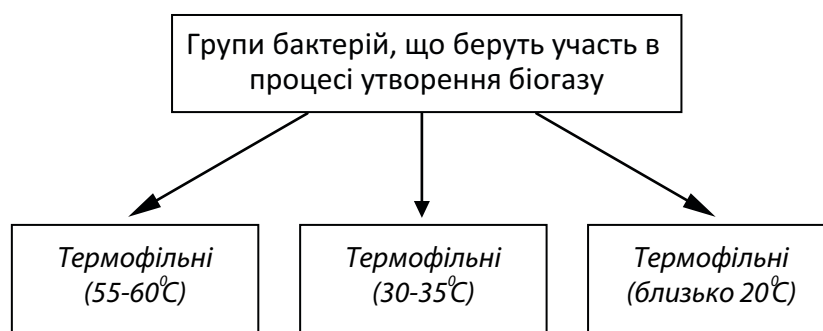


Рис. 2 Класифікація метаноутворюючих бактерій за температурним режимом [33]

Термофільні бактерії більш продуктивні, ніж мезофільні. Завдяки цьому, при однаковій кількості виробництва біогазу за день, місткість ферментаційних резервуарів може бути значно меншою. Разом з тим, враховуючи необхідність підтримання більш високої температури маси, що бродить, витрати теплової енергії при реалізації термофільних процесів є значно вищими. При низькій температурі навколишнього середовища та недостатній ізоляції резервуара витрати теплової енергії можуть бути настільки великими, що біогазу, який виробляється, не вистачить для обігрівання бродильної маси. У зв'язку з цим у європейських кліматичних умовах ферментаційні камери звичайно працюють у мезофільному діапазоні температур.

Важливою умовою забезпечення регулярного протікання біохімічних процесів в метантенку є слабо-лужна реакція бродильного середовища, при цьому задовільним вважають рН на рівні 6-8 (оптимальне значення знаходиться в межах 7-7,5 рН). Надто лужна реакція сприяє ферментації через патогенне гниття, але викликає небажане виділення сірководню. У надто кислому середовищі (при ферментації побутових відходів, виділень свиней) метанове бродіння може зупинитись із блокуванням виділення біогазу.



Суттєве значення в процесі бродіння мають мікроорганізми. Для забезпечення метанової ферментації необхідна наявність у речовині метаногенних мікроорганізмів. Ці мікроорганізми розвиваються лише у сприятливих умовах □ в анаеробному середовищі з слабо-лужною реакцією. Для поліпшення протікання ферментації необхідне прищеплення відповідних колоній бактерій. Бажано також стимулювати початок ферментації шляхом додавання вже ферментованого субстрату, тобто прищепити сировині бактерії відповідного штаму, які реалізують цей процес. З метою уніфікації температури органічної речовини, що піддається ферментації, а також розповсюдження мікроорганізмів в біомасі, проводять систематичне її перемішування. Перемішування збродженної речовини попереджає місцеву ферментацію, що викликається патогенами [35].

Таким чином, анаеробне збродження з отриманням біогазу є складним біотехнологічним процесом, який потребує подальшого удосконалення технологічного обладнання для забезпечення максимального виходу біогазу та підвищення економічної ефективності переробки рослинної біомаси та гною в органічні добрива.

3. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Вирішення проблем переробки відходів сільськогосподарського походження, відкрили новий перспективний напрямок у конструюванні техніки та обладнання для агропромислового комплексу. Аналіз літературних джерел [1] свідчить про стрімкий процес впровадження у виробництво інноваційних ресурсозберігаючих технологій. Австрія, Італія, Китай, Німеччина, Польща, Чеська Республіка та інші країни за останні 20 років зробили значний крок у використанні поновлювальних джерел енергії та продовжують розвивати свої науково-технічні досягнення у галузі альтернативної енергетики.

Ще у XVII столітті Ян Баптист Ван Гельмонт виявив, що біомаса, яка розкладається, виділяє займисті гази. Алессандро Вольта в 1776 році прийшов до висновку про існування залежності між кількістю біомаси яка розклалася і кількістю газу, що виділився. У 1808 році сер Хемфрі Деві виявив метан в біогазі. [2].

Перша задокументована біогазова установка була побудована в Бомбеї (Індія) в 1859 році. У цьому ж році біогаз почав застосовуватися у Великобританії для вуличного освітлення [3].

Ринок біогазу на сьогоднішній час найбільш розвинений у Європі, це пояснюється тим, що саме розвинені країни ЄС першими впровадили програми переходу до альтернативних джерел енергії та планомірно підтримували ініціативи, спрямовані на впровадження нових біогазових технологій.

У європейській практиці 75% біогазу виробляється з відходів сільського господарства, 17% – з органічних відходів приватних домогосподарств і підприємств, ще 8% – з муніципальних каналізаційних стоків та каналізаційних стоків окремих виробництв [4].

Сьогодні перше місце за кількістю діючих біогазових комплексів належить



Німеччині – в 2010 році їх налічується понад 9 тисяч. Тільки 7% виробленого цими підприємствами біогазу надходить в газопроводи, решта – використовується для потреб виробника. У перспективі 10-20% природного газу, який використовується в країні, може бути замінений біогазом. З точки зору масштабів застосування біогазу лідирує Данія: даний вид палива забезпечує майже 20% енергоспоживання країни.

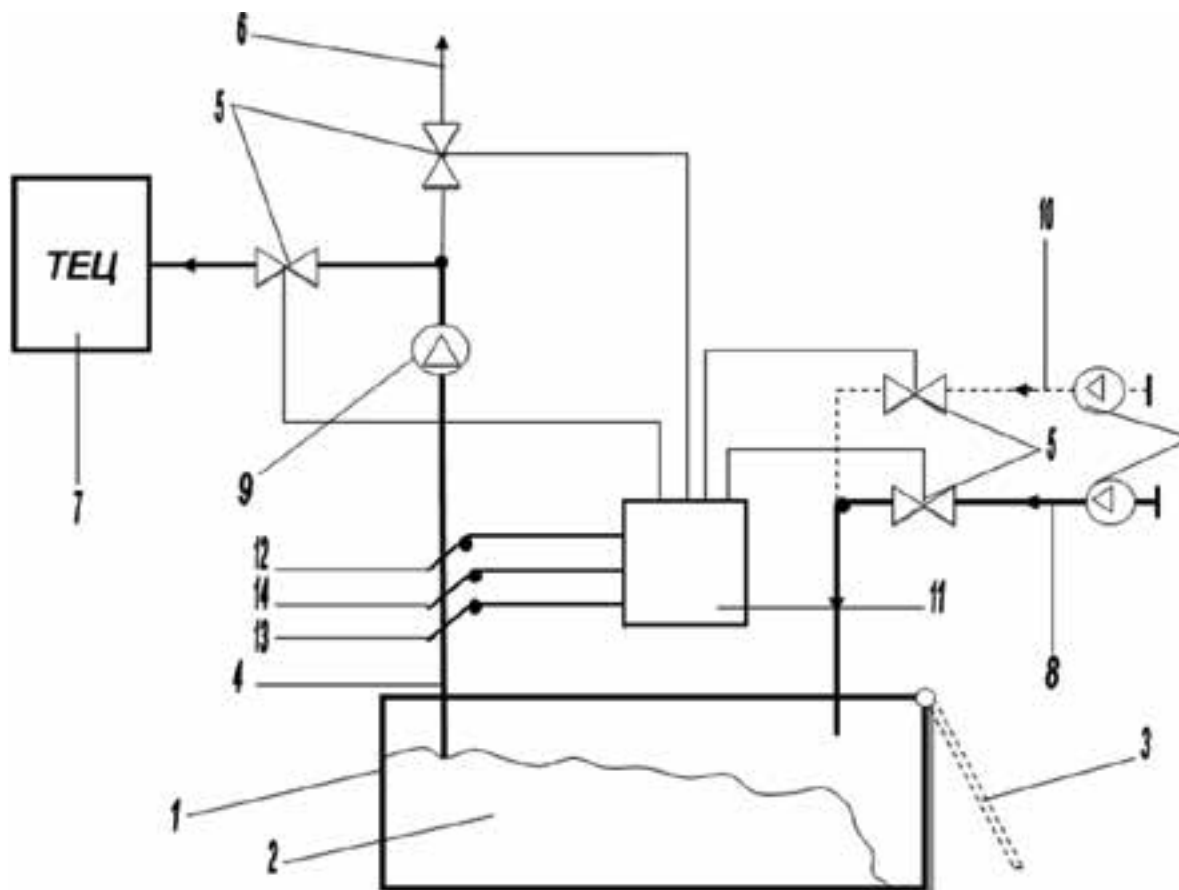
В Україні біогазові технології не мають широкого поширення у промислових масштабах. Наявні лише поодинокі випадки їх використання, в режимі дослідних установок без підтвердження їх економічної ефективності на рівні експертних висновків.

Сучасні біогазові установки розділяються на два види за технологією підготовки і бродіння сировини: рідкофазна технологія (вологість зброджуваної органічної маси більше 85 %) і твердофазна (вологість органічної маси менше 85 %).

Твердофазне бродіння являє собою серію послідовних операцій (рис. 3). Вихідна сировина, наприклад, біологічні відходи, гній, шлам, жири або зелена маса, поміщаються в герметично закритий ферментер і, як правило, нагріваються та перемішуються. При цьому, внаслідок анаеробних процесів, утворюється біогаз. У даний час біогаз застосовується, в основному, для комбінованого виробництва електроенергії і тепла в блокових міні-ТЕЦ.

Газову суміш очищають від сірководню (H_2S) і подають до газопоршневого двигуна, який приводить в обертання генератор. Вироблений таким чином електричний струм надходить в мережу. Тепло із системи охолодження двигуна і тепло вихлопних газів відводяться за допомогою теплоносія для подальшого використання. Частина цього тепла (15-30%) необхідна для підігріву біосировини та підтримання вибраної температури ферментації, так як бактеріальні штами, що відповідають за розкладання біомаси, найбільш продуктивні в діапазоні температур від $37^{\circ}C$ (мезофільні) до $55^{\circ}C$ (термофільні). Надлишкове тепло може бути використане різними споживачами.

Найбільш ефективні установки з цілорічним використанням тепла. В деяких проектах біогаз збагачується і закачується в газопровід. Таким чином зростають шанси для будівництва біогазової установки в тих зонах, де відсутні виробники тепла. Збагачений біогаз також може бути використаний як паливо в автотранспорті. Після метанового зброджування залишковий субстрат практично не має неприємного запаху і застосовується як органічне добриво у сільськогосподарському виробництві [5].



1 – ферментер; 2 – біомаса; 3 – завантажувально-розвантажувальний отвір; 4 – вихід біогазу; 5 – клапан; 6 – газопровід; 7 – блок ТЕЦ; 8 – лінія відпрацьованого газу ТЕЦ; 9 – вентилятор; 10 – лінія свіжого повітря; 11 – пульт управління; 12 – датчик метану; 13 – датчик концентрації вуглекислого газу; 14 – датчик для визначення об’ємної витрати біогазу.

Рис. 3 Схема твердофазної біогазової установки

З метою визначення впливу технологічних показників, які необхідні для вибору режимів ферментації гною та конструктивно-технологічних параметрів ферментера на вихід біогазу під час твердофазної ферментації органічної сировини в анаеробних умовах, були проведені експериментальні дослідження. Свіжий підстилковий гній ВРХ завантажувався у ферментер дискретно чотири рази на добу через 6 годин відповідно до експозиції зброджування.

Основним критерієм оцінки роботи ферментера при проведенні експериментальних досліджень був показник питомого виходу біогазу з кілограма сухої речовини. Вихід біогазу контролювався щодобово газовим лічильником, показники якого заносились в журнал випробувань ферментера.

В результаті експериментальних досліджень отримано рівняння регресії, які встановлює залежність питомого виходу біогазу від температури, експозиції зброджування і вологості гною ВРХ, яке має наступний вигляд:

$$V = 94,2 - 2,235W - 0,6389T - 0,4358\tau + 0,0146W^2 + 0,0047T^2 + 0,0042\tau^2 + 0,0032WT + 0,0045W\tau - 0,0002T\tau \quad (1)$$



де: V – питомий вихід біогазу, л/кг сухої маси за добу; W – вологість біомаси, %; T – температура зброджування, $^{\circ}\text{C}$; τ – експозиція зброджування, діб.

Графічна інтерпретація рівняння (1) приведена на рис.4–6. Із них видно, питомий вихід біогазу однозначно збільшується при збільшенні вологості гною та температури і експозиції зброджування. Так при експозиції ферментації гною 15 діб та при вологості зброджуваної маси гною ВРХ $W=77\%$ і температурі зброджування $T=35^{\circ}\text{C}$ питомий вихід біогазу не перевищував 1 л/кг сухої маси за добу, а при вологості зброджуваної маси $W=87\%$ та температурі зброджування $T=53^{\circ}\text{C}$ питомий вихід біогазу знаходився в межах 4-5 л/кг сухої маси за добу (рис. 4).

При температурі зброджування $T=44^{\circ}\text{C}$ та експозиції ферментації гною до 25 діб, при вологості зброджуваної маси гною ВРХ $W=77\%$ питомий вихід біогазу не перевищує 1 л/кг сухої маси за добу. При цій же температурі зброджування вихід біогазу в межах 4-5 л/кг сухої маси за добу спостерігався при вологості гною $W=87\%$ і експозиції зброджування 20-25 діб (рис. 5).

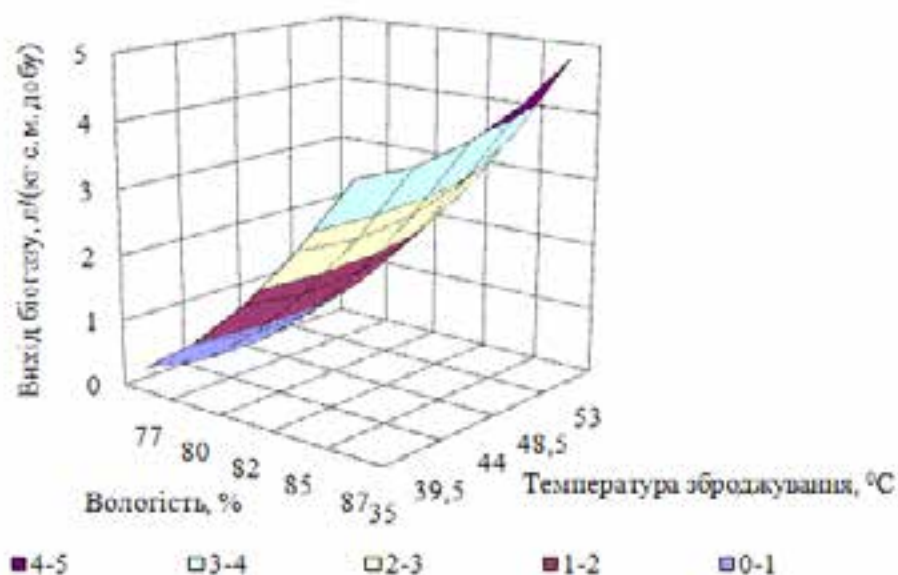


Рис. 4 Залежність виходу біогазу від температури зброджування і вологості біомаси

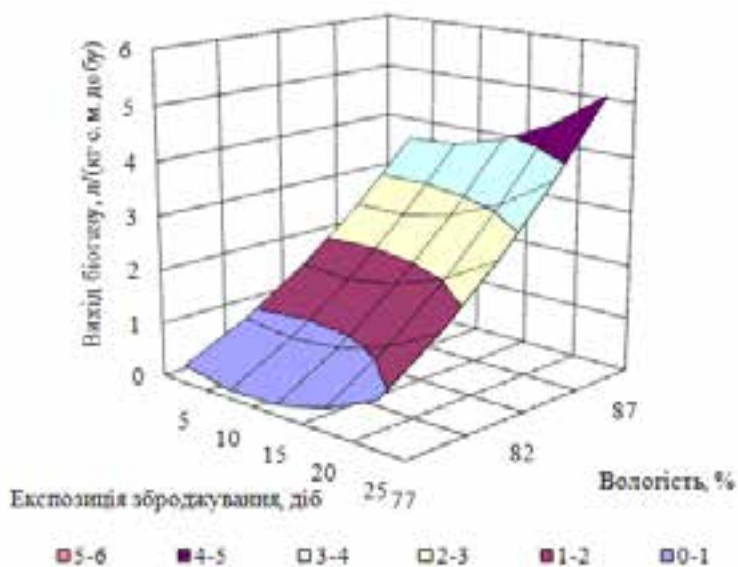


Рис. 5 Залежність виходу біогазу від вологості біомаси і експозиції зброджування

При вологості гною $W=82\%$ збільшення виходу біогазу спостерігалось лише через 15 днів зброджування. При цьому виявлений неоднозначний вплив температури на питомий вихід біогазу. Найнижчий вихід біогазу спостерігався при температурі зброджування в межах від 37 до 39°C .

У питанні розвитку технологій твердо фазного зброджування необхідно приділяти увагу удосконаленню мікробіологічних процесів ферментації біомаси та пошуку ефективних конструктивно-технологічних рішень ферментерів, особливо це стосується технологічних операцій завантаження біомаси, її безперервного перемішування і дотримання стабільного температурного режиму роботи ферментера.

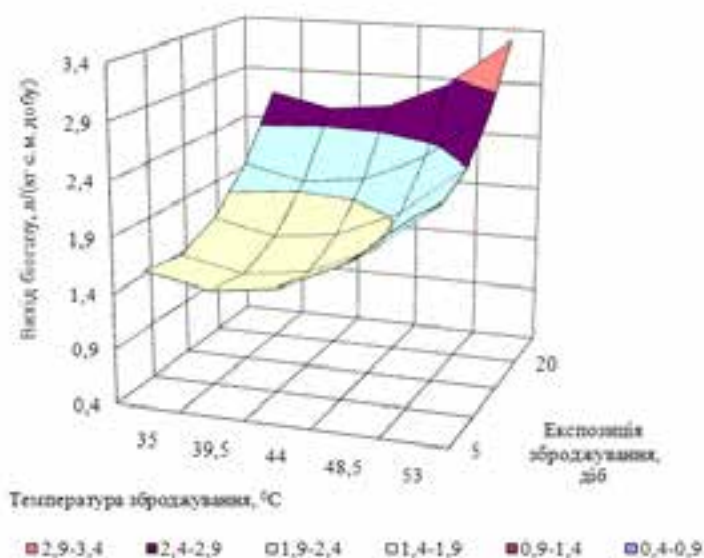


Рис. 6 Залежність виходу біогазу від температури і експозиції зброджування



Таким чином, низька ефективність процесу виділення метану під час твердофазного бродіння в існуючих біореакторах обумовлена в першу чергу відсутністю засобів для проведення належної гомогенізації реагуючої біомаси.

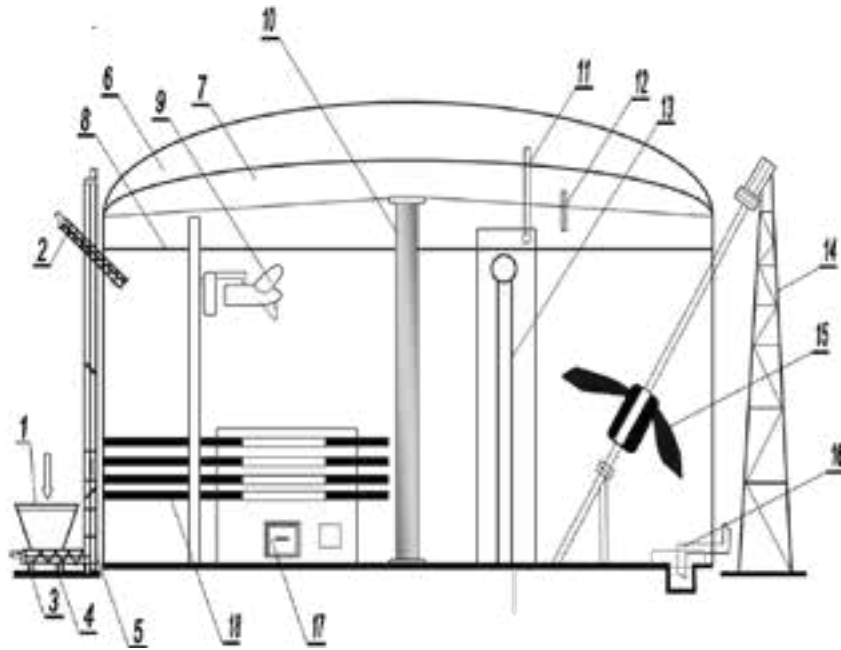
При твердофазному зброджуванні, в залежності від фізичного стану сировини, а також потреб замовника, варіанти виконання біогазових установок можуть відрізнятися як технологіями переробки так і устаткуванням. Кожен проект біогазової установки індивідуальний, але створений із застосуванням типових рішень, адаптованих до навколишніх умов.

Поширеним методом виробництва біогазу є анаеробне зброджування рідкої біомаси ($W=90-95\%$) метаногенеруючими мікроорганізмами. Застосування рідкофазних технологічних процесів є більш поширеним у практиці використання біогазових установок. Цей процес полягає у безперервному введенні невеликими порціями вхідної сировини в метантенк, який представляє собою місткість-змішувач без доступу повітря, де підтримується задана вологість і температура. Схема біореактора яким в основному комплектують зарубіжні БГУ, представлена на (рис. 7).

Такі реактори виконуються із залізобетону або сталі і мають антикорозійне покриття. Спеціальні мішалки забезпечують переміщення сировини з основною реагуючою біомасою. Це сприяє певній однорідності ферментаційної суміші, частково стримуючи утворення поверхневої кірки. Виділений в процесі ферментації біогаз накопичується під куполом, потім проходить систему очищення і подається до споживачів (котел або когенераційна установка) [6].

Біогазові установки з анаеробними реакторами такої конструкції в даний час є діючим елементом сучасного, безвідходного виробництва в багатьох галузях сільського господарства та харчової промисловості. Якщо на підприємстві є відходи сільського господарства або харчової промисловості, з'являється реальна можливість за допомогою біогазових установок не тільки значно скоротити витрати на енергію, але й підвищити ефективність підприємства, отримати додатковий прибуток.

У конструкціях біогазових установок закладений принцип модульності, що дозволяє при необхідності нарощувати їх продуктивність.



1 – бункер для сипкого субстрату; 2 – подавальний гвинтовий транспортер; 3 – вагова платформа; 4 – гвинтовий нижній транспортер; 5 – піднімаючий гвинтовий транспортер; 6 – повітряний купол; 7 – біогазовий купол; 8 – рівень наповнення; 9 – вертикальна рухома мішалка; 10 – центральна опора; 11 – труба для подачі повітря; 12 – патрубок для біогазу; 13 – труба для подачі рідкого гною; 14 – опора для мішалки; 15 – похила мішалка; 16 – патрубок для відведення біомаси; 17 – система регулювання температури; 18 – система підігріву біомаси.

Рис. 7 Схема рідкофазної біогазової установки

На ринку Західної Європи присутня значна різноманітність біогазових установок різної потужності та конструкцій: великих (більше 1000 кВт), середніх (від 500 до 1000 кВт) та малих установок (до 500 кВт). У діючих БГУ переважають реактори циліндричної форми. У таких реакторах з певною ефективністю можна перемішувати субстрат, вивантажувати зброджений субстрат, видаляти біогаз і руйнувати поверхневу кірку.

При будівництві реакторів використовують бетон, залізобетон, сталевий лист, склопластик. Місткість бродильної камери не повинна мати доступу повітря, а корпус має мати теплоізоляцію і корозійну стійкість. У середині бродильної камери має підтримуватися постійна температура, для чого вона обладнана пристроями для термостабілізації. Слід зазначити, що представлений варіант біореактора як і більшість існуючих, мають теплоізоляцію і забезпечують працездатність взимку не тільки в районах південної і центральної Європи з м'яким кліматом, а і в країнах з континентальним кліматом [7].

Недоліком такого типу біогазових реакторів є те, що за рахунок недостатнього та нерівномірного прогрівання різних частин суміші, коливання температур в об'ємі субстрату стають значними. Це порушує технологічні вимоги та зменшує продуктивність щодо виходу біогазу порівняно з теоретичним. За рахунок невідповідностей вертикального градієнту температур у нижній зоні утворюється холодний малорухомий шар, а верхня зона перегрівасться. До недоліків таких реакторів можна віднести великі площі теплообмінників, що призводить до значного зростання вартості спорудження реактора. Технологія бродіння в біогазових



установках потребує дотримання визначених прийнятних меж температурного режиму, та стабілізації теплообміну між нагрівником і субстратом.

Досвід експлуатації таких рідкофазних реакторів вказує на складності обумовлені недосконалістю процесу, який виконується із застосуванням механічних гвинтових мішалок, можливості яких перемішувати субстрат в конкретний період часу в конкретному об'ємі не проводячи перемішування шарів субстрату у вертикальній площині, не задовольняє вимогам технологічного процесу гомогенізації та потребам підводу поживних речовин до колоній метаноутворюючих мікроорганізмів по всьому об'єму біореактора. Крім того, в таких реакторах не усувається явище розшарування біомаси з утворенням непродуктивних баластних шарів з різною питомою вагою.

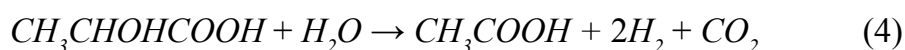
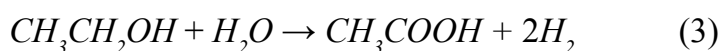
У результаті накопичення мінеральної складової біомаси в нижній частині реактора в процесі експлуатації БГУ продуктивність реакторів падає і на протязі 2-3 років складає 50% в відношенні до проектної, значно погіршуючи експлуатаційні і економічні показники виробництва біогазу. Звільнення від баластних шарів є трудомісткою операцією, яку необхідно виконувати у шкідливих умовах [95].

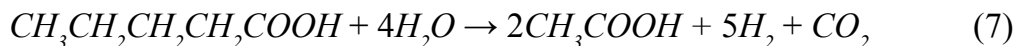
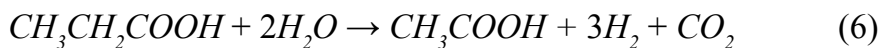
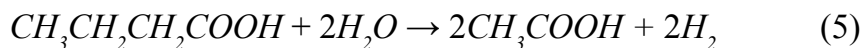
На вирішення технологічної проблеми щодо накопичення мінеральної складової біомаси в нижній частині реактора необхідно направляти зусилля по удосконаленню конструкцій реакторів БГУ. Для цього необхідно розробити технічні рішення для усунення розшарування біомаси, зменшити енерговитрати на процес перемішування, створити технологічні і технічні рішення утилізації теплової енергії для можливостей використання термофільного режиму, забезпечити використання інокуляції і мобілізації.

Таким чином, зброджування гною дає змогу вирішити економічні, екологічні та санітарно-епідеміологічні проблеми, що виникають в наслідок накопичення великої кількості відходів тваринництва. Виробництво біогазу є однією з безвідходних технологій, яка виконує природоохоронну і ресурсозберігаючу функцію, адже воно не лише не призводить до утворення будь яких відходів, а і утилізує відходи сільськогосподарського, спиртового, харчового та інших виробництв. І разом з тим, частково дозволяє вирішувати проблему збереження традиційних енергоносіїв [22, 23, 24, 26], що є надзвичайно важливим у сучасних умовах.

4. АНАЛІЗ МЕТАНОУТВОРЕННЯ В БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

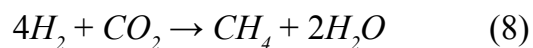
Відомо [8, 9], що на першій стадії анаеробного зброджування під дією бактерій відбувається гідроліз субстрату з утворенням органічних кислот, спиртів, простих вуглеводів. На другій стадії утворюється оцтова кислота, водень та вуглекислий газ. Ці стадії анаеробного зброджування можуть бути узагальнені наступними рівняннями:





де $C_6H_{12}O_6$ – глюкоза; CH_3CH_2OH – етанол; $CH_3CH(OH)COOH$ – лактат; $CH_3CH_2CH_2COOH$ – масляна кислота; CH_3CH_2COOH – пропіонова кислота; $CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$ – валеріанова кислота; H_2O – вода; CH_3COOH – оцтова кислота; H_2 – водень; CO_2 – вуглекислий газ.

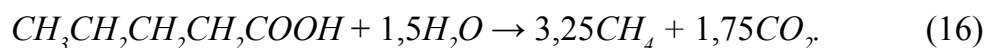
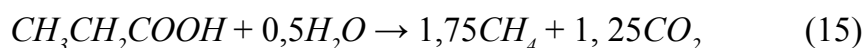
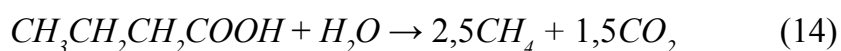
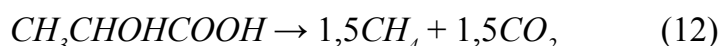
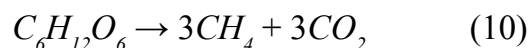
У подальшому, метаногенез відбувається за рахунок діяльності мікроорганізмів, які відновлюють вуглекислий газ до метану, а також таких, що розкладають в кінцевому підсумку оцтову кислоту на метан і вуглекислий газ [8]. Рівняння біохімічних реакцій стадії метаногенезу анаеробної ферментації мають наступний вигляд:



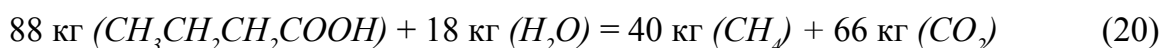
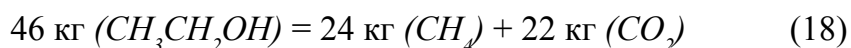
де CH_4 – метан.

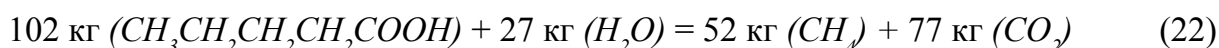
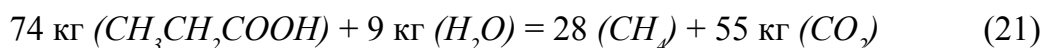
Опубліковані джерела свідчать про наявність різних методик визначення питомого виходу біогазу при роботі біогазових установок, проте є необхідність проведення поглибленого аналізу факторів, що зумовлюють виробництво біометану, а також обґрунтування напрямів інтенсифікації цього процесу.

Поєднавши рівняння стадії утворення оцтової кислоти, водню та вуглекислого газу (2-7) з рівняннями метаногенезу (8, 9), отримуємо:



Розрахунковий матеріальний баланс анаеробної ферментації вищенаведених органічних речовин біомаси у відповідності із рівнянням (10-16) буде мати наступний вигляд:





Дані розрахунку матеріального балансу (табл. 1) показують, що при анаеробній ферментації від 60 до 80% метану утворюється за рахунок розщеплення оцтової кислоти і від 20 до 40% за рахунок використання водню для відновлення вуглекислого газу до метану, що підтверджує дані наведені в роботі [8].

Таким чином, мікробіологічний розклад під час анаеробної ферментації 1 кг органічної речовини супроводжується виділенням в середньому 0,4 кг метану та 0,7 кг вуглекислого газу [25].

Приймаючи допущення, що біогаз складається тільки із двох газів – газу метану і вуглекислого газу, для визначення щільності біогазу за нормальних умов скористаємося співвідношенням:

$$\rho_{БГ}^H = \rho_{CH_4}^H k_{CH_4} + \rho_{CO_2}^H (1 - k_{CH_4}) \quad (23)$$

де $\rho_{CH_4}^H$ – щільність метану за нормальних умов, $кг_{CH_4}/M_{CH_4}^3$; $\rho_{CO_2}^H$ – щільність вуглекислого газу за нормальних умов, $кг_{CO_2}/M_{CO_2}^3$; k_{CH_4} – об'ємний вміст біометану в біогазі, $M_{CH_4}^3/M_{БГ}^3$.

Щільність метану та вуглекислого газу за нормальних умов визначимо з урахуванням допущення, що біогаз є сумішшю ідеальних газів. Згідно рівняння стану ідеального газу при нормальних умовах [10] можна записати:

Таблиця 1

Показники виходу біометану при анаеробній ферментації

№ п/п	Складова частина біомаси	Вихід біометану, %:		Масовий вихід в перерахунку на 1 кг розкладеної біомаси	
		за рахунок розщеплення CH_3COOH	за рахунок відновлення CO_2	CH_4	CO_2
1	$C_6H_{12}O_6$	66,7	33,3	0,267	0,733
2	CH_3CH_2OH	66,7	33,3	0,522	0,478
3	$CH_3CHOHCOOH$	66,7	33,3	0,267	0,733
4	$CH_3CH_2CH_2COOH$	80	20	0,455	0,75
5	CH_3CH_2COOH	57,1	42,9	0,378	0,743
6	$CH_3CH_2CH_2CH_2COOH$	61,5	38,5	0,51	0,755
	В середньому	66,45	33,55	0,4	0,7

$$\rho_{CH_4}^H = \frac{p_{БГ}^H M_{CH_4}}{R_M T_{БГ}^H}, \quad \rho_{CO_2}^H = \frac{p_{БГ}^H M_{CO_2}}{R_M T_{БГ}^H}, \quad (24)$$

де $p_{БГ}^H$ – тиск біогазу в реакторі, Па; M_{CH_4} – молярна маса метану, яка дорівнює



відносній масі молекули метану, кг/кмоль; M_{CO_2} – молярна маса вуглекислого газу, яка дорівнює відносній масі молекули вуглекислого газу, кг/кмоль;

$R_M = 8314,41 \frac{Дж}{кмоль\ K}$ – універсальна газова постійна; T_{BG}^H – температура біогазу в реакторі, K .

Приклад розрахунку щільності метану, вуглекислого газу та біогазу при умовах роботи біогазового реактора та за нормальних умов приведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Розрахунок щільності біогазу

Показник	Од. виміру	CH ₄	CO ₂
Розрахунок при умовах роботи біогазового реактора			
Універсальна газова постійна	Дж/(кмоль К)	8314,41	
Молярна маса	кг/кмоль	16	44
Тиск біогазу	Па	102551	
Температура біогазу	°С	37	
Щільність газу	кг/м ³	0,636	1,750
Об'ємний вихід на 1 кг розкладеної біомаси	м ³ /кг	0,628	0,399
Концентрація газу в біогазі	%	61,1	38,9
Вага газу в 1 м ³ біогазу	кг/м ³ _{БГ}	0,389	0,680
Щільність біогазу	кг_{БГ}/м³_{БГ}	1,069	
Розрахунок при нормальних умовах			
Тиск біогазу	Па	101325	
Температура біогазу	°С	0	
Щільність газу	кг/м ³	0,714	1,963
Вага газу в 1 м ³ біогазу	кг/м ³ _{БГ}	0,436	0,763
Щільність біогазу	кг_{БГ}/м³_{БГ}	1,199	

Приймавши допущення про те, що кількість утвореного біогазу визначається інтенсивністю розкладу органічної речовини під час зброджування органічної біомаси, вихід біогазу при зброджуванні у перерахунку на нормальні умови може бути визначений наступним чином:

$$V_{BG} = \rho_{BM} \left(1 - \frac{W_{BM}}{100} \right) k_{OM} k_{OM}^P \frac{m_{BG}}{\rho_{BG}^H}, \quad (25)$$

де V_{BG} – питомий вихід біогазу із реактора за нормальних умов, M_{BG}^3/M_{BM}^3

за добу; ρ_{BM} – щільність біомаси, $кг_{BM}/M_{BM}^3$; W_{BM} – вологість біомаси, %;

$\left(1 - \frac{W_{BM}}{100} \right)$ – вміст сухої речовини по відношенню до загальної кількості



біомаси, k_{CM} / k_{BM} ; k_{OM} – вміст органічної маси по відношенню до загальної кількості сухої маси у біомасі, що зброджується, k_{OM} / k_{CM} ; k_{OM}^P – кількість розкладеної за добу органічної маси по відношенню до загальної кількості органічної маси, k_{ROM} / k_{OM} за добу; m_{BG} – вихід біогазу в розрахунку на одиницю розкладеної органічної маси, k_{BG} / k_{ROM} ; ρ_{BG}^H – щільність біогазу за нормальних умов, k_{BG} / M_{BG}^3 .

У той же час питомий вихід біометану становитиме:

$$V_{CH_4} = V_{BG} \cdot k_{CH_4}, \quad (26)$$

де V_{CH_4} – питомий вихід біометану із реактора за нормальних умов, $M_{CH_4}^3 / M_{BM}^3$ за добу.

Приклад розрахунку питомого виходу біометану із реактора за нормальних умов проілюстровано на рис. 8 і з урахуванням вищенаведеного прикладу визначення щільності біогазу, при рівні розкладу органічної маси 3 % за добу та при заданих значеннях параметрів біомаси, приведеніх у таблиці 3.

При параметрах, приведеніх у таблиці 3, залежність між інтенсивністю розкладу органічної маси та питомим виходом біометану і біогазу, а також часом зброджування, буде мати вигляд приведений на рис. 9.

Як видно із рис. 9, вихід біогазу та біометану зростає пропорційно із підвищенням рівня розкладу органічної біомаси в реакторі, а час зброджування до досягнення 30 % рівня зброджування при цьому знижується за експонентою.

Таким чином, основним напрямком інтенсифікації процесу зброджування гною є підвищення рівня розкладу органічної маси за рахунок створення відповідних умов для розвитку анаеробної мікрофлори. Це може бути забезпечено за рахунок створення стабільних заданих температурних умов зброджування та, що особливо важливо, забезпеченням якісного перемішування біомаси, яке з одної сторони не повинно порушувати симбіоз ацетогенних та метаногенних бактерій, а з іншої не допускати розшарування біомаси в реакторі на мінеральний осад та плаваючий органічний шар.



Рис. 8 Схематичне зображення виходу біометану та біогазу із розкладеної органічної маси

При використанні проточних реакторів існує можливість того, що незначна частина поданої в реактор свіжої біомаси зразу ж буде вивантажена із реактора. Найкраще це питання вирішується за рахунок подачі в реактор невеликих порцій субстрату декілька разів на день, а також використання декількох реакторів, що працюють, як паралельно так і послідовно.

Таблиця 3

Розрахунок питомого виходу біогазу та біометану

Показник	Од. виміру	Значення
Густина гною	$\text{кг}_{\text{БМ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$	1050
Вологість	%	92
Вміст води	$\text{кг}_V/\text{кг}_{\text{БМ}}$	0,92
Вміст сухої маси	%	8
	$\text{кг}_{\text{СМ}}/\text{кг}_{\text{БМ}}$	0,08
Вміст органічної маси	%	80
	$\text{кг}_{\text{ОМ}}/\text{кг}_{\text{СМ}}$	0,8
Інтенсивність розкладу органічної маси	% за добу	3,0
	$\text{кг}_{\text{РОМ}}/\text{кг}_{\text{ОМ}}$ за добу	0,03
	$\text{кг}_{\text{РОМ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$ за добу	2,016
Вихід біогазу із розкладеної органічної маси за нормальних умов	$\text{кг}_{\text{БГ}}/\text{кг}_{\text{РОМ}}$	1,1
	$\text{м}^3_{\text{БГ}}/\text{кг}_{\text{РОМ}}$	0,92
Вихід біогазу із реактора за нормальних умов	$\text{м}^3_{\text{БГ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$ за добу	1,85
Вихід біометану за нормальних умов	$\text{м}^3\text{CH}_4/\text{м}^3_{\text{БМ}}$ за добу	1,129
Максимальний рівень розкладу органічної біомаси	%	30
	$\text{кг}_{\text{РОМ}}/\text{м}^3_{\text{БМ}}$	20,2
Час зброджування	Діб	10



Частина твердих мінеральних включень, які містяться в субстратах на основі гною, звільняється в процесі біологічного розкладу в реакторі. Мінеральний осад призводить до зменшення корисного об'єму реактора. Досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що уже зустрічаються реактори наполовину заповнені мінеральним осадом, який можливо видалити лише екскаватором після повної зупинки процесу зброджування.

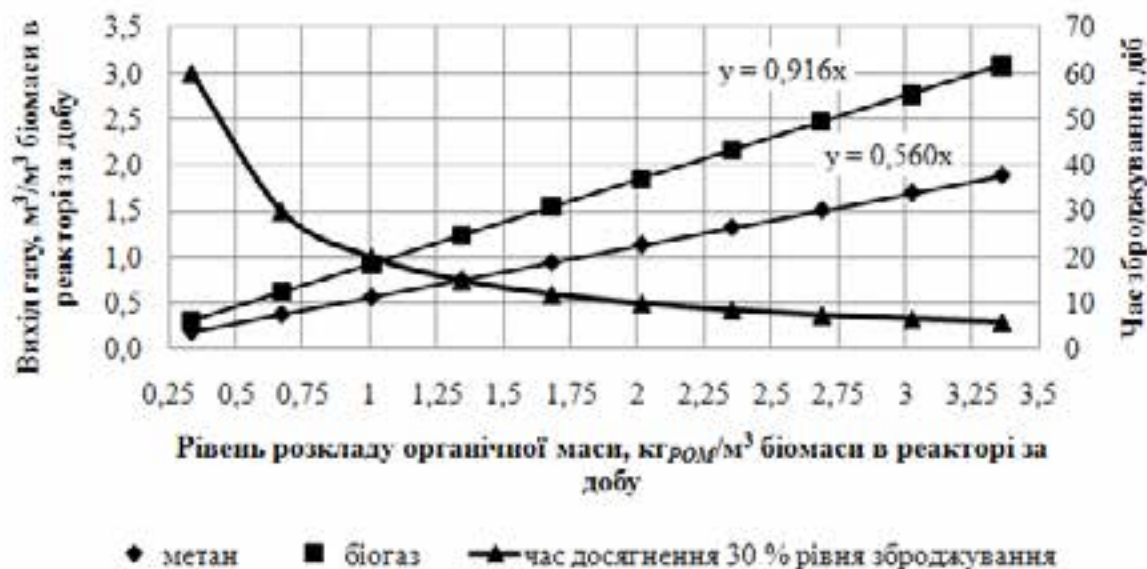


Рис. 9 Вплив інтенсивності розкладу органічної маси на питомий вихід біометану, біогазу та час зброджування

Плаваючі шари, особливо на основі волокнистих субстратів, часто утворюють кірку і якщо її не розмішати, то реактор також необхідно зупинити для її видалення. Вказані недоліки біогазових установок відмічалися також в наших роботах [12, 13].

5. КІНЕТИКА ЗБРОДЖУВАННЯ ОРГАНІЧНОЇ МАСИ В БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

Оскільки розклад органічної речовини обумовлений розвитком мікроорганізмів, ріст яких описується кінетичними рівняннями [18], а також вважаючи, що швидкість розкладу органічної речовини під час біогазової ферментації пропорційна кількості нерозкладеної органічної речовини [19], що ще може бути розкладена, кінетичне рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси в диференційній формі буде мати вигляд:

$$\frac{dM}{d\tau} = -k(M - M^*) \quad (27)$$

де M – вміст органічної речовини біомаси, що не розклалася на поточний момент часу біогазової ферментації, кг; M^* – уміст органічної речовини біомаси, яка не розкладається під час біогазової ферментації, кг; k – параметр процесу біогазової



ферментації, який характеризує її швидкість, діб⁻¹; τ – час біогазової ферментації, діб.

Провівши математичні перетворення та інтегрування диференційного рівняння у межах умісту органічної речовини від початкового значення до поточного, одержимо однопараметричне рівняння процесу анаеробної ферментації, яке визначає вміст органічної речовини, що не розклалася на поточний момент часу:

$$M = M^* + (M_0 - M^*) \exp(-k\tau) \quad (28)$$

де M_0 – загальний вміст органічної речовини біомаси на початок біогазової ферментації, кг.

В той же час кількість органічної речовини біомаси, яка розклалася на поточний момент часу, становить:

$$M_0 - M = (M_0 - M^*) [1 - \exp(-k\tau)] \quad (29)$$

Привівши кількість органічної речовини, що розклалася на поточний момент часу, до загального вмісту органічної речовини на початок біогазової ферментації, одержимо формулу для визначення рівня розкладу органічної речовини на поточний момент часу

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \exp(-k\tau)] \quad (30)$$

де $\alpha_0 = \frac{M_0 - M^*}{M_0}$ – максимальний рівень розкладу органічної речовини в процесі анаеробної ферментації, відносних од.

Враховуючи те, що максимальний рівень розкладу органічної сировини біомаси при довгостроковій експозиції під час анаеробної ферментації становить для біомаси зеленої маси трав – 45 %, а для кукурудзяного силосу – 59 % [16, 17], кінетичне рівняння процесу анаеробної ферментації рослинної біомаси буде мати вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-k_{3MT}\tau)] \quad (31)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-k_{KC}\tau)] \quad (32)$$

Розрахунок параметра процесу анаеробної ферментації, який характеризує її швидкість, проведемо згідно методики [20] та на основі експериментальних даних за формулою:

$$k = \exp \left[N^{-1} \left(\sum h \left(h \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - \alpha_s} \right) - \sum h \tau_s \right) \right] \quad (33)$$

де N – кількість вимірів;



Для розрахунку швидкості процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу, скористаємося експериментальними даними [16, 17].

Розрахунки показали, що для процесу анаеробної ферментації швидкість розкладу органічної речовини становить: для зеленої маси трав –

$$k_{зМТ} = 0,095 \text{ дїб}^{-1}; \text{ для кукурудзяного силосу} - k_{зМТ} = 0,119 \text{ дїб}^{-1}.$$

Таким чином, кінетичні рівняння процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу будуть мати наступний вигляд:

– для зеленої маси трав

$$\alpha = 0,45 [1 - \exp(-0,095\tau)] \quad (34)$$

– для кукурудзяного силосу

$$\alpha = 0,59 [1 - \exp(-0,119\tau)] \quad (35)$$

У графічному вигляді кінетичні рівняння (34, 35) приведені на рис. 10 [27].

Таким чином, розроблені кінетичні рівняння розкладу органічної сировини під час процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав та кукурудзяного силосу. Установлено, що швидкість процесу анаеробної ферментації кукурудзяного силосу на чверть перевищує швидкість процесу анаеробної ферментації біомаси зеленої маси трав.

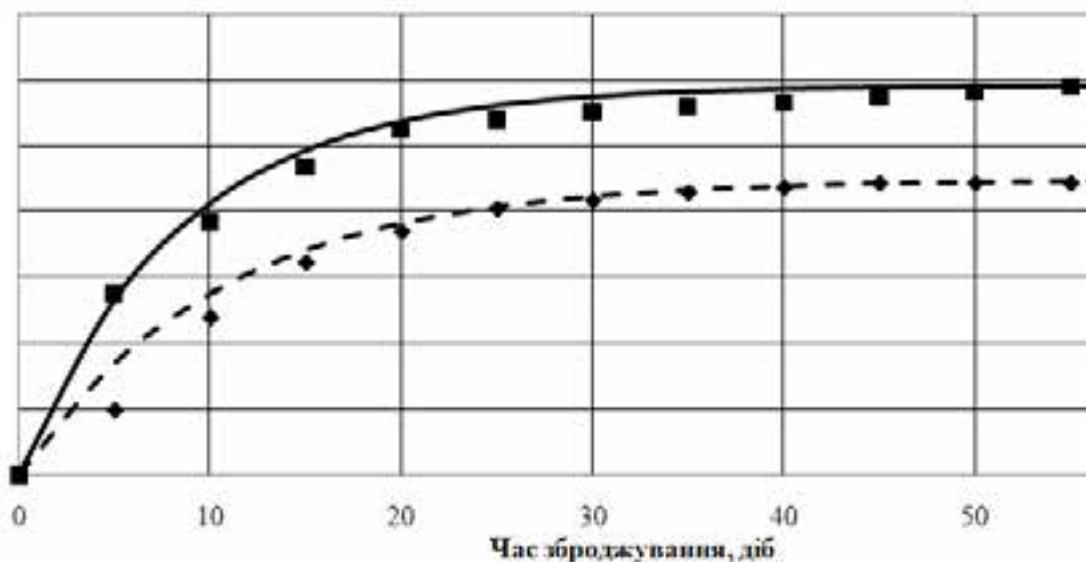


Рис. 10 Кінетика процесу біогазової ферментації органічної сировини



6. КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З МОДУЛЬНИМ БІОРЕАКТОРОМ ТА КОНСТРУКЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З ОБЕРТОВИМ РЕАКТОРОМ

Ліквідація існуючих недоліків в роботі рідкофазних БГУ значно полегшується при застосуванні циліндричних біореакторів з внутрішнім обертовим корпусом, що має горизонтальну вісь обертання і який занурений в рідину. Така конструкція біореакторів забезпечує гомогенізацію реагуючої біомаси по всьому робочому об'єму обертового корпусу. За рахунок природного вертикального руху складових частин реагуючого субстрату під дією сил гравітації. Так при повороті обертового корпусу на 180° його поздовжня перегородка міняє координати кожної складової частини реагуючого субстрату, в тому числі і поверхні газового переходу, на координати з протилежним знаком відносно осі обертання, забезпечує поступальний вертикальний рух частинок і газових бульбашок на рух протилежним напрямом, чим досягається перемішуванням біомаси і її гомогенізація. Поступальний горизонтальний рух реагуючого субстрату виконується за рахунок перепадів рівня рідини в місцях загрузки свіжої біомаси та в місці вивантаження відпрацьованого субстрату.

У таких реакторах енергія перемішування іде на обертання рухомого корпусу (циліндричного зануреного в рідину тіла навколо його горизонтальної осі) і зводиться практично до виконання роботи по подоланню сили інерції завантаженого біомасою обертового корпусу та роботу по подоланню незначної сили тертя в розвантажених опорних підшипниках цього корпусу.

В результаті застосування такого методу перемішування реагуючої біомаси значно зменшується технологічні енерговитрати, що в значній мірі покращує економічні показники БГУ в яких застосовано біореактора даної конструкції.

Існуючі вітчизняні та зарубіжні установки мають декілька основних технологічних і технічних проблем, що потребують додаткової уваги на їх вирішення. До технологічних проблем відносяться: довгострокові зупинки роботи біореактрів для видалення накопичених непродуктивних компонентів реагуючої біомаси; неконтрольована експозиція компонентів реагуючого субстрату в реакторі; великі об'єми патогенної біомаси, що концентруються в зоні життєдіяльності людей і тварин; низька інтенсивність процесу виділення біогазу. До технічних проблем відносяться: необхідність застосування матеріалів для створення обладнання БГУ з високими протикорозійними якостями; необхідність створення теплообмінників для рідин з низькою теплопровідністю; необхідність створення пристроїв для дозованого видалення відпрацьованої біомаси.

Напрямки усунення недоліків БГУ наступні: розробка технологічної схеми БГУ, до складу якої входять пристрої для виділення з біосировини механічних включень, в т.ч. органічного та мінерального походжень; застосовуються біореакторів з постійно рухомим реагуючим субстратом; зменшення робочих об'ємів реакторів за рахунок застосування термофільного процесу та інокуляції вхідної біомаси; застосовується теплообміну на всіх етапах технологічного процесу із застосуванням



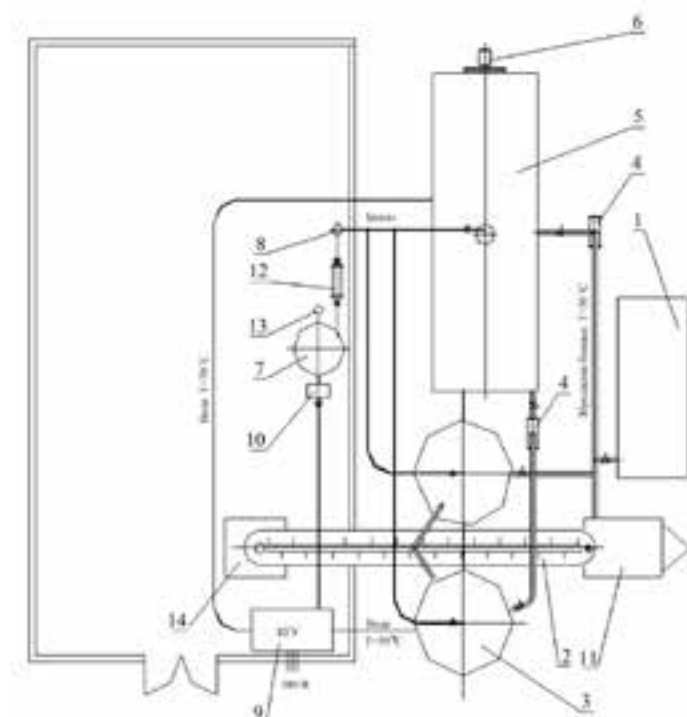
тепла, отриманого, як від спалювання біогазу, так і рекуперованого.

Традиційний підхід до конструювання обладнання БГУ в основному із чорних металів має вагомні недоліки. Одним із них є його недовговічність, пов'язана з хімічною корозією. Дослідження показали, що зменшення товщини металу, що застосовуються в конструкції підігрівача-витримувача та біореактора-метантенка упродовж річної експлуатації БГУ досягає 0,7 мм. Вимушені конструкторські рішення з застосуванням високовуглецевих сталей товщиною до 10 мм не оправдано збільшують вагу і вартість комплексу обладнання БГУ. Застосування корозійно стійких металів значно збільшує вартість цього обладнання через велику собівартість цих металів.

Розробка конструкційно-технологічної схеми БГУ виконана з урахуванням попередньо проведених НДР і представлена на рис. 11.

До неї як нова ланка технологічного ланцюга ввійшов процес інокуляції сировини перед анаеробним зброджуванням. В залежності від механізації утримання тварин та птиці визначено вологості вихідної біомаси для оптимізації комплектування допоміжним обладнанням БГУ та конструювання відповідного обладнання, яке забезпечує основний процес анаеробного зброджування органічної сировини та інші технологічні процеси в роботі БГУ.

Біосировина для біогазових установок являє собою суміш органічних та мінеральних речовин тваринного та рослинного походження. В їх склад входять: жири, білки, клітковина, вапнякові та інші мінеральні компоненти. Поступаючи в анаеробні умови біореактора і змішуючись метаногенеруючою мікрофлорою жири, білки та подрібнена клітковина активно приймають участь у метаногенезі, в той час, як мінеральні компоненти та не подрібнена клітковина не приймають участі в утворенні біогазу.



- 1 – накопичувач зброженої біомаси; 2 – транспортер-розділювач; 3 – підігрівач-витримувач; 4 – гвинтовий насос; 5 – біореактор; 6 – привідна станція мішалки біореактора; 7 – газгольдер; 8 – вологовідділювач; 9 – когенераційна установка; 10 – газовий редуктор; 11 – причіп; 12 – насос вакуумний; 13 – труба для скидання біогазу; 14 – гніззбірник

Рис. 11 Конструкційно-технологічна схеми БГУ-60 модульного типу

Маючи різну питому вагу ці речовини розділяться, утворюючи легкий шар із клітковини, який спливає до верхньої частини біореактора і важкий шар з мінеральної складової реагуючого субстрату, який осідає в нижню



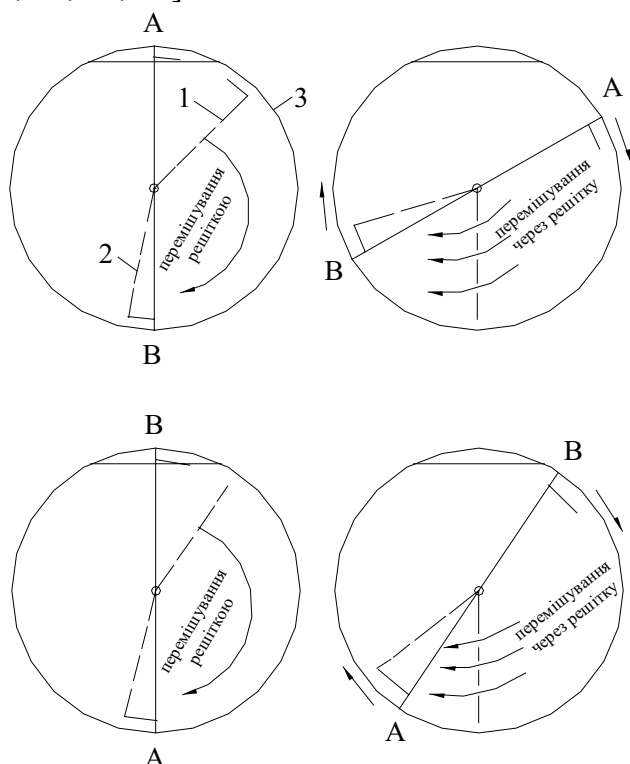
частину реактора. Ці шари непродуктивного субстрату під час роботи біогазової установки при існуючих конструкціях біореакторів не виносяться з реактора при вивантаженні відпрацьованої біомаси і, залишаючись в реакторах, значно зменшують їх робочий об'єм понижаючи вихід біогазу, погіршуючи екологічні показники зброженої біомаси, як органічного добрива, знижуючи економічну ефективність від застосування БГУ.

Комплекти обладнання БГУ включають в себе на аеробній стадії механізми досконалого подрібнення органічних складових біомаси і гравітаційного звільнення її від мінеральної складової шляхом витримки сировини в приймальних місткостях та сепарації її за допомогою вібраційних решіт відповідної конструкції.

В результаті приведених науково дослідних робіт розроблено нову технологічну схему біореактора, що передбачає можливість недопущення розшарування біомаси за рахунок різної питомої ваги компонентів біомаси. Конструкція біореактора виконана таким чином, що дозволяє повертати частинки, з яких складається біомаса, в координати попереднього стану за рахунок повороту всього об'єму суміші на 180° , не допускаючи розшарування на легку та важку фракції.

Необхідне перемішування реагуючого субстрату виконується решітчастими елементами, які приводяться в рух за рахунок повороту на 180° перегородки обертового корпусу і прогону через них реагуючої біомаси, коли решітка знаходиться в нижньому вертикальному положенні (рис. 12).

Така конструкція біореактора дозволяє змінювати координати реагуючого субстрату, який є сумішшю речовин з різною питомою вагою та забезпечити стабільність розподілення цих речовин по всій масі реагуючого субстрату упродовж всього технологічного процесу зброджування в анаеробних умовах [28, 29, 30, 31, 32].



А,В – діаметральна перегородка; 1,2 – решітки рухомі; 3 – горизонтальний циліндричний обертовий корпус біореактора

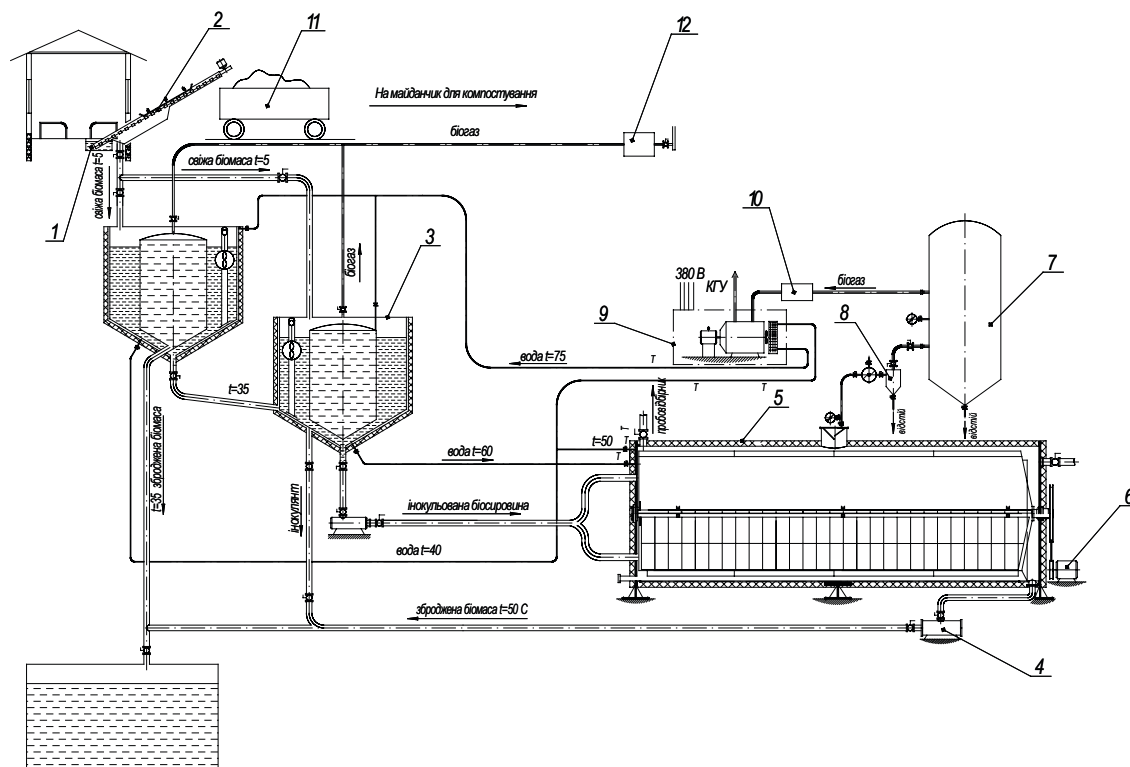
Рис. 12 Схема перемішування біомаси в біореакторі із застосуванням решіток

На основі норм ЄСКД проведено розробку конструкторської документації експериментальної біогазової установки з обертовим реактором, яка передбачає систему подачі гною в реактор біогазової установки, перемішування органічної біомаси в реакторі та видалення біогазу із реактора біогазової



установки. При цьому забезпечувалася можливість центрування обертового реактора в корпусі та можливість його розбирання і збирання. В основу розробки комплексу обладнання для анаеробного зброджування біомаси з метою отримання біогазу та високоякісних екологічно чистих добрив покладено термотолерантний температурний режим (44°C-45°C), який підтримується в модульному біореакторі з обертовим внутрішнім корпусом з інокуляцією біосировини на стадії переходу її від аеробної підготовки до процесу метаногенезу.

Розроблена модульна біогазова установка удосконаленої конструкції представлена на рис. 13.



1 – накопичувач гною; 2 – похилий транспортер-розділювач; 3 – підігрівач; 4 – гвинтовий насос; 5 – метантенк; 6 – привід; 7 – газгольдер; 8 – відділювач вологи; 9 – когенераційна установка; 10 – редуктор; 11 – тверда фракція гною; 12 – котел для обігріву

Рис. 13 Модульна біогазова установка удосконаленої конструкції

При розробці комплексу обладнання БГУ-60 з модульним біореактором особливу увагу було звернуто на використання рекуперації тепла як основи теплозабезпечення теплових процесів застосованих в даній розробці. Основою теплового обладнання є зброджена маса та когенераційна установка (теплова енергія із системи охолодження двигуна внутрішнього згорання), паливом для якої є біогаз після хімічної очистки від сірчаних та фосфорних речовин.

Залишок від використання енергоносіїв може використовуватись в господарстві де змонтовано БГУ.

Застосування модульних біореакторів з внутрішнім обертовим корпусом МБР-60 може покривати необхідність в БГУ різної потужності в усьому діапазоні типорозмірного ряду.



Таким чином, отримані конструкційно-технологічні рішення БГУ та конструкційні рішення обертових реакторів можуть слугувати базою для розробки БГУ для конкретних господарств.

7. СПОСОБИ ЗАВАНТАЖЕННЯ СУБСТРАТУ В МЕТАНТЕНК

Відомі періодичний та поступовий способи завантаження субстрату в метантенк.

При періодичному способі завантаження сировина завантажується в метантенк один раз протягом всього циклу зброджування. Максимальний вихід біогазу спостерігається протягом декількох діб, після чого інтенсивність його генерації поступово знижується аж до повного припинення. Час повного розкладання біомаси при анаеробному зброджуванні може становить 30-45 діб, однак вихід біогазу в цьому випадку низький і не забезпечує прибутковості біогазової установки.

Поступовий спосіб завантаження сировини передбачає щоденне завантаження невеликих порцій сировини.

Процеси, що відбуваються при періодичному метановому зброджуванні гноївки в метантенку, повністю узгоджуються з процесами, що проходять при культивуванні мікроорганізмів в біореакторах, і розділяються на декілька фаз. Розглянемо процес метанового зброджування сировини в метантенку об'ємом 30 л на прикладі переробки гноївки ВРХ при температурі 55° (рис. 14). На початковому етапі, після додавання нового субстрату, спостерігається лаг-фаза, або фаза звикання мікроорганізмів до нових умов. У метантенк додається від 1/2 до 1/3 його об'єму гноївки, і стільки ж біошламу зливається. Метанові бактерії, які залишилися в «затравочній» порції субстрату в метантенку, певний час звикають до нового субстрату. На рис. 3 процес звикання триває перші чотири дні. У даному випадку, такий довгий період лаг-фази обумовлений тим, що до нової заправки в якості субстрату в метантенку був курячий послід, розведений водою, а температура зброджування становила 40°C. У разі додавання в метантенк однотипного субстрату за умови незмінності температурного режиму час лаг-фази істотно скорочується. Після звикання бактерій до нових умов вони починають активно рости і розмножуватися, виділяючи при цьому велику кількість біогазу. Процес переходить в експотенціальну (логарифмічну) фазу (на рис. 3 відповідає період з 4 по 8 день зброджування). По мірі вичерпання поживних властивостей субстрату та накопичення в ньому продуктів обміну, швидкість росту знижується і процес переходить у фазу уповільнення росту (період з 8 по 15 день на рис. 14) і далі в стаціонарну фазу, в якій процеси ділення і відмирання бактерій в популяції знаходяться в динамічній рівновазі (період з 15 по 20 день на рис. 14). Коли вичерпання поживних речовин в субстраті і накопичення продуктів метаболізму долають порогові концентрації, починається фаза відмирання і число бактерій в популяції поступово знижується. Відповідно, знижується і обсяг виробленого біогазу. Період фази відмирання відповідає часу з 20 по 35 день на рис. 14.

Якщо субстрат складається із декількох компонентів, може спостерігатись явище діаксії, коли бактерії виробивши один компонент субстрату, переходять на живлення іншим компонентом. В цьому випадку спостерігається два піки



максимального виходу біогазу.

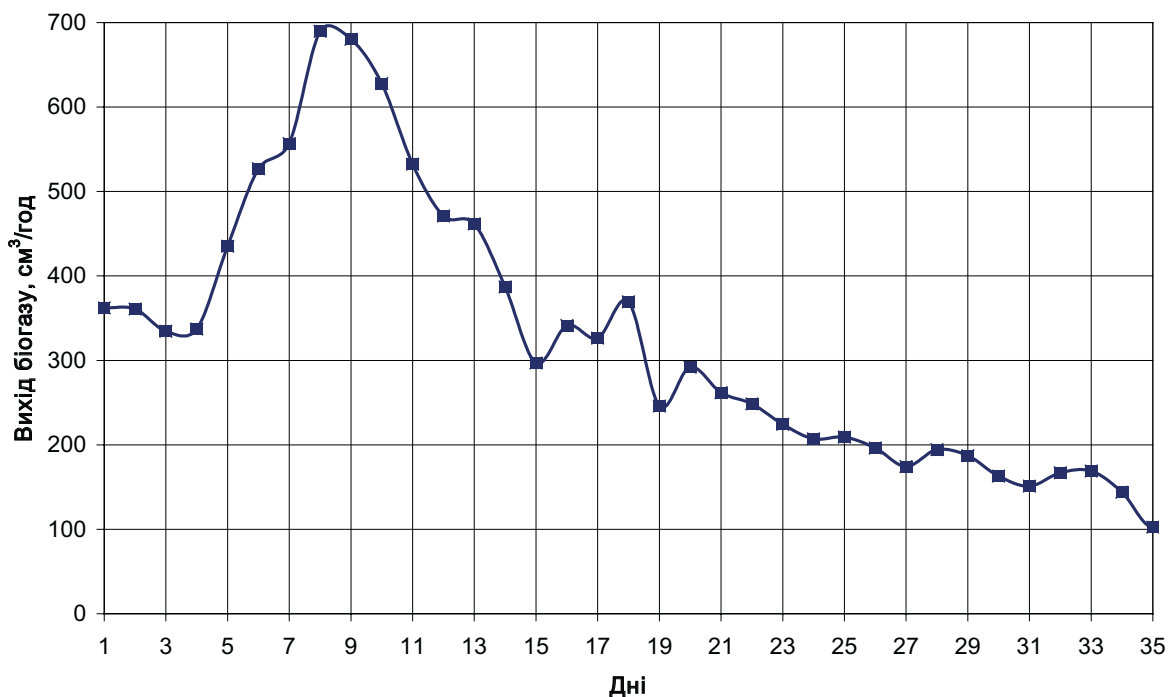


Рис. 14 Процес метанового зброджування гноівки ВРХ вологістю 93% при температурі 550С [36; 40]

Недоліки періодичного анаеробного способу зброджування біомаси, коли період ефективного виробництва біогазу становить тільки близько 7-8 діб під час протікання логарифмічної фази і частини фази затримки росту при наступному поступовому зниженні рівня виходу біогазу, відсутні при безперервному метановому бродінні біомаси, де шляхом дозованої подачі субстрату в метантенк невеликими порціями і дозованого відбирання біошламу досягається постійна робота біореактора при логарифмічній фазі зброджування, що суттєво підвищує ефективність виробництва біогазу [36; 40].

Для рівномірного розподілення виходу біогазу в часі застосовується безперервна подача субстрату в метантенк, при якій субстрат подається на протязі дня великою кількістю незначних порцій, з одночасним видаленням відпрацьованого біошламу. При цьому кожна нова порція завантаженого в метантенк субстрату буде формувати свій максимум виходу біогазу (рис. 15). Максимуми від кожної порції завантаженого субстрату будуть формувати загальний вихід біогазу з метантенку, який суттєво перевищуватиме вихід біогазу при періодичному завантаженні. При чому, чим частіше будуть завантажуватись нові порції субстрату, тим більш рівномірним буде загальний вихід біогазу.

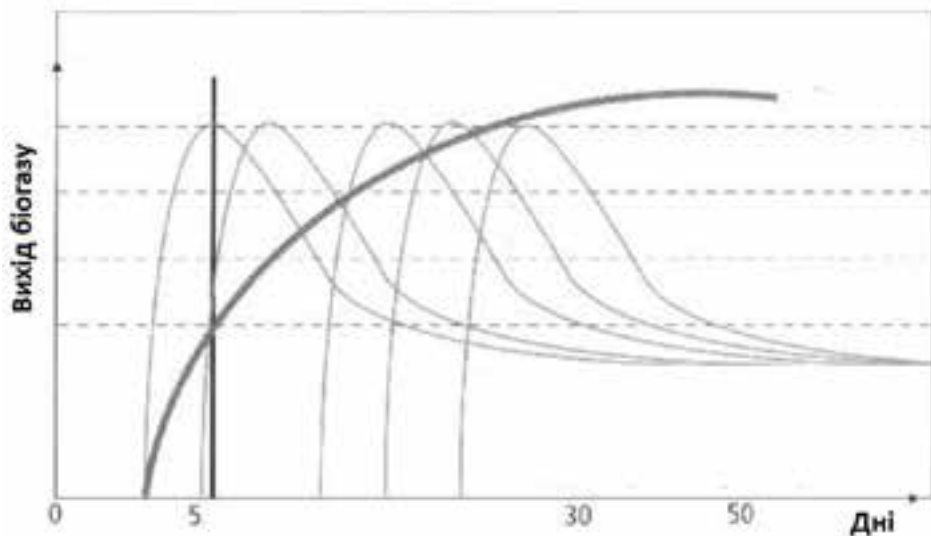


Рис. 15 Схематичне зображення формування виходу біогазу при безперервному завантаженні субстрату в метантенк [39]

Результати дослідження генерації біогазу при поступовому завантаженні субстрату наведені на рис. 16, із якого видно, що бродіння супроводжується двома піками максимального виходу біогазу.

Початок відліку співпадає із першим піком, після чого настає затухання генерації біогазу, і на шосту добу бродіння спостерігається другий пік генерації біогазу. На 8 добу бродіння вихід біогазу стабілізується і в подальші дні спостерігається відносно рівномірна генерація біогазу із незначним збільшенням його виходу в часі. При збільшенні числа завантажень субстрату протягом доби відхилення виходу біогазу від середнього значення будуть зменшуватись [39].

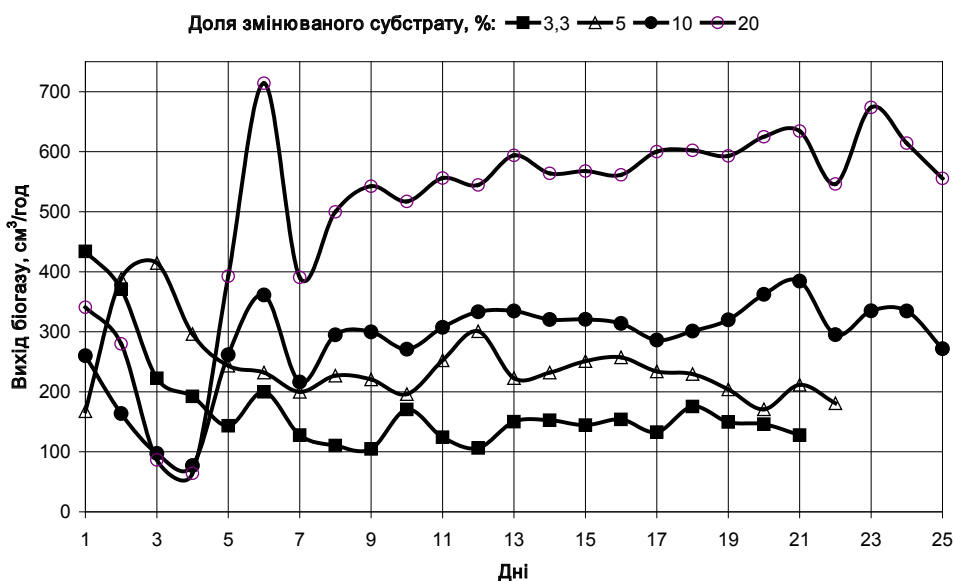


Рис. 16 Генерація біогазу при поступовому завантаженні субстрату [38; 39]



Розрахункові значення середнього виходу біогазу при бродінні гною ВРХ з додаванням 3% гліцерину від маси гною ВРХ, наведені в табл. 4.

Для порівняння в табл. 5 наведені основні показники біогазової установки з метантенком об'ємом 10 м³ залежно від добового виходу біогазу з одиниці маси субстрату.

8. ВПЛИВ КОСУБСТРАТИВ НА ВИХІД БІОГАЗУ

Косубстратами називаються речовини, які додаються до основного субстрату для інтенсифікації процесу бродіння.

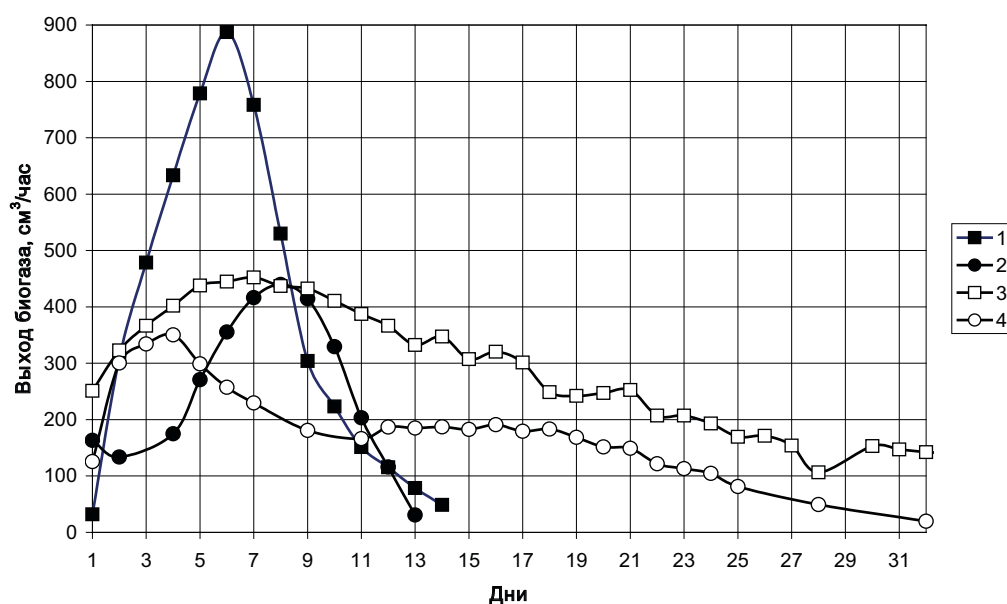
В якості косубстратів при дослідженні застосовувалися крохмаль і гліцерин.

Результати досліджень показали, що використання косубстратів веде до різкого збільшення інтенсивності метанового зброджування (рис. 17).

Таблиця 4

Розрахункові прогнозовані значення середнього виходу біогазу при бродінні гною ВРХ з додаванням 3% гліцерину від маси гною ВРХ [38; 39]

Доля заміненого субстрату, %	1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Вихід біогазу, л/(кгЧ	3	1,8	7,8	13,8	19,8	25,8	31,9	37,9	43,9	49,9	55,9	61,9



1 – з додаванням 0,1 л неочищеного гліцерину при температурі бродіння 50°C; 2 – з додаванням крохмалю при температурі бродіння 40°C; 3 – без косубстратів при температурі бродіння 50°C; 4 – без косубстратів при температурі бродіння 40°C

Рис. 17 Вихід біогазу при метановому зброджуванні гноївки ВРХ при використанні косубстратів і без них [37; 40]:



Таблиця 5

Основні показники біогазової установки з метантенком об'ємом 10 м³ залежно від добового виходу біогазу з одиниці маси субстрату [39]

Показник	Вихід біогазу з одиниці маси субстрату, л/(кгЧ						
	2	5	10	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8
Вихід біогазу, м ³ /добу	14,7	36,8	73,5	110,3	147,1	183,8	220,6
Об'єм біогазу, що використовується для корисних цілей, %:							
Січень	*	*	48,0	74,0	82,7	87,0	89,6
Лютий	*	*	48,1	74,0	82,7	87,0	89,6
Березень	*	*	48,4	74,2	82,8	87,1	89,7
Квітень	*	*	49,1	74,5	83,0	87,3	89,8
Травень	*	10,8	55,4	77,7	85,1	88,9	91,1
Червень	*	21,7	60,8	80,4	86,9	90,2	92,2
Липень	*	25,5	62,8	81,4	87,6	90,7	92,6
Серпень	*	22,1	61,0	80,5	87,0	90,3	92,2
Вересень	*	5,0	52,5	76,2	84,2	88,1	90,5
Жовтень	*	*	49,0	74,5	83,0	87,3	89,8
Листопад	*	*	48,6	74,3	82,9	87,1	89,7
Грудень	*	*	48,2	74,1	82,7	87,1	89,6
Січень	*	*	48,0	74,0	82,7	87,0	89,6
Коефіцієнт товарності	-	0,053	0,527	0,763	0,842	0,882	0,905

Примітка. * виробленого біогазу не вистачає для підтримання температурного режиму метантенка

При добавці догноївки ВРХ крохмалю при температурі зброджування 40⁰С загальний час логарифмічної фази і фази уповільнення росту становить приблизно 7 діб (з 4 по 11 добу, крива 2, рис. 17), за час яких виділяється 65469 см³ біогазу (або в середньому 9353 см³/добу). Стаціонарна фаза і фаза відмирання дуже короткі, складають всього декілька днів, бродіння швидко припиняється. При зброджуванні гноївки ВРХ при температурі 40⁰С без додавання крохмалю загальний час логарифмічної фази і фази уповільнення росту становить приблизно 9 діб (з 1 по 9 добу, криві 3 і 4, рис. 17), за час яких виділяється 35168 см³ біогазу (або в середньому 2512 см³/добу). Непродуктивні фази стаціонарна і відмирання дуже довгі і складають 23 діб і більше.

Використання як косубстрату неочищеного гліцерину, який є відходом виробництва біодизеля і викликає великі проблеми з його утилізацією, ще більшою мірою інтенсифікує метанове зброджування гноївки ВРХ. При температурі зброджування 50⁰С загальний час логарифмічної фази і фази уповільнення росту становить близько 9-11 діб (крива 1, рис. 17), за час яких виділяється 114453-123560 см³ біогазу (або в середньому 11266-12717 см³/добу). Фази стаціонарна, сповільнення росту і відмирання також дуже короткі, становлять декілька днів, а бродіння швидко припиняється [37; 40].

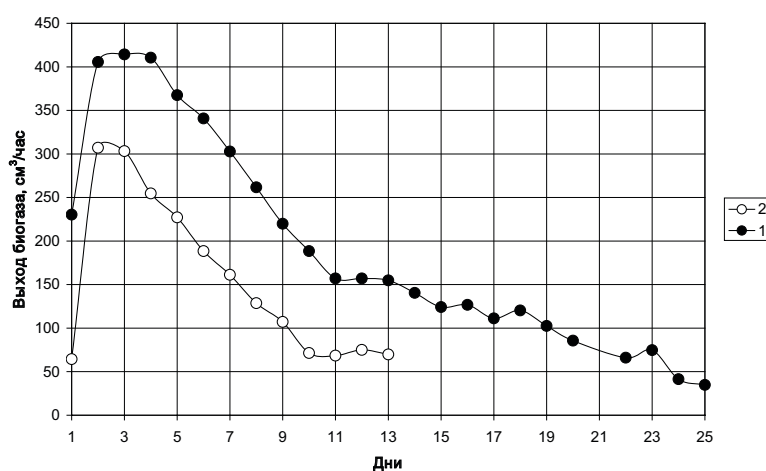


9. ВПЛИВ ВИДУ СУБСТРАТУ ТА ЙОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ НА ВИХІД БІОГАЗУ

Дослідження проводились на різних субстратах: гноївка ВРХ, курячий послід та їх суміші. При дослідження впливу гною ВРХ на вихід біогазу брався до уваги раціон корму: в одному випадку основу корму складала концкорми і сіно, в іншому випадку - солома.

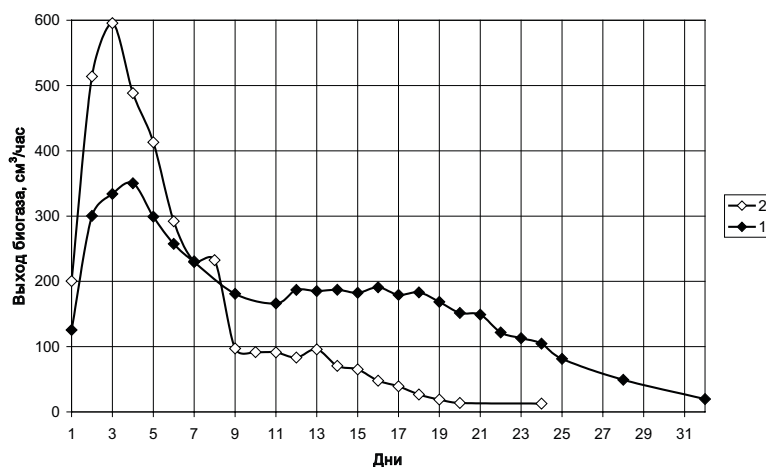
Дослідження впливу годівлі ВРХ на вихід біогазу представлено на рис. 18. За наявності в гної великої кількості неперетравленої целюлози і геміцелюлози вихід біогазу зменшується в 1,7 рази.

При використанні в якості субстрату курячого посліду, у порівнянні з гноївкою ВРХ, вихід біогазу різко зростає (рис. 19).



1 – при кормлінні ВРХ сіном і концентратами; 2 – при кормлінні ВРХ грубими кормами (соломою)

Рис. 18 Вихід біогазу при метановому зброджуванні гноївки ВРХ вологістю 93% при температурі 40°C [37; 40]



1 – гноївки ВРХ вологістю 93% при температурі 40°C; 2 – курячого посліду вологістю 73% при температурі 40°C

Рис. 19 Вихід біогазу при метановому зброджуванні різних субстратів без перемішування [37; 40]



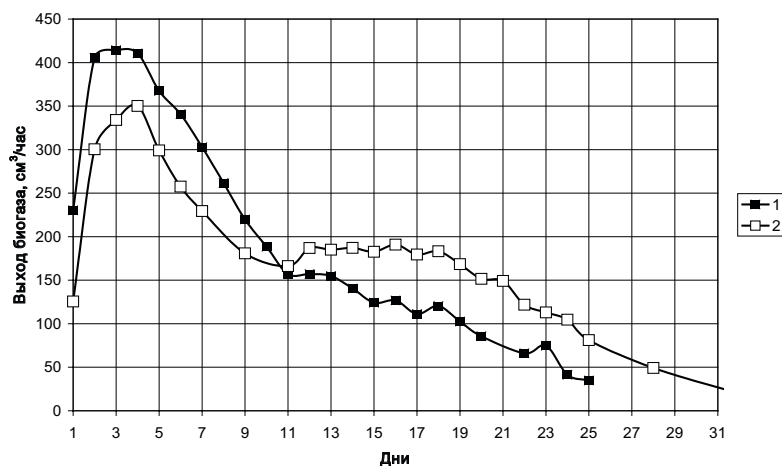
Разом із тим, при зброджуванні курячого посліду, на відміну від гноївки ВРХ, спостерігається підвищений вихід сірководню, про що свідчить характерний запах, а вихід метану помітно менший. Так, перші 10 днів біогазу взагалі не горить, наступні кілька днів горіння спостерігається, але дуже погане, з перервами, часто горіння переривається. При використанні в якості субстрату суміші гноївки ВРХ і курячого посліду вихід біогазу, в порівнянні із зброджуванням чистої гноївки ВРХ, збільшується, однак вміст метану в такому біогазі низький. Так, при температурі бродіння 55°C і 50°C повноцінне горіння біогазу спостерігається лише на 7 день роботи метантенка, при 45°C і 350С - на 4 день.

Горіння біогазу, утвореного при зброджуванні гноївки ВРХ, в більшості дослідів спостерігалось з першого дня зброджування, лише в деяких випадках фіксувалося відсутність його горіння в перші 1-2 дні [37].

При дослідженні впливу перемішування субстрату на вихід біогазу в якості субстрату використовувався гній ВРХ. На одному реакторі перемішування не проводилося, на другому один раз на добу проводилось перемішування субстрату. Результати досліджень представлені на рис 20, із якого видно, що за відсутності перемішування вихід біогазу зменшується майже в 1,3 рази [40].

10. СОБІВАРТІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ В УМОВАХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ

Ресурсною базою для виробництва біометану в сільськогосподарських підприємствах є рідкий гній. Загальновідомо, що витрати на виробництво біометану в сільськогосподарських підприємствах включають виробничі витрати на одержання біометану за вирахуванням перевищення вартості органічних добрив над вартістю гною:



1 – при перемішуванні; 2 – без перемішування

Рис. 20 Вихід біогазу при метановому зброджуванні гноївки ВРХ вологістю 93% при температурі 40°

$$B_{БМ} = V_{БМ} C_{БМ} = m_{ГН} C_{ГН} - m_{ОД} C_{ОД} + E_{БМ}, \quad (36)$$



звідки виробнича собівартість виробництва біометану, з урахуванням того, що $m_{ГН} \approx m_{ОД} = m_{ПБ}$, становить:

$$\begin{aligned} C_{БМ} &= \frac{m_{ПБ}}{V_{БМ}}(Ц_{ГН} - Ц_{ОД}) + E_{БМ} = \frac{V_{ПБ}\rho_{ПБ}}{V_{БМ}}(Ц_{ГН} - Ц_{ОД}) + E_{БМ} = \\ &= 365 \frac{V_p \rho_{ПБ}}{V_{БМ} \tau_{ЗБ}}(Ц_{ГН} - Ц_{ОД}) + E_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}}(Ц_{ГН} - Ц_{ОД}) + E_{БМ}, \end{aligned} \quad (37)$$

а перевищення ціни органічних добрив над ціною гною для забезпечення нульової собівартості біометану становитиме:

$$Ц_{ОД} - Ц_{ГН} = \frac{E_{БМ} k_{БМ} \tau_{ЗБ}}{\rho_{ПБ}}, \quad (38)$$

або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$Ц_{ОД} - Ц_{ГН} = \frac{(E_{БМ} + A_{БМ}) k_{БМ} \tau_{ЗБ}}{\rho_{ПБ}}, \quad (39)$$

де $V_{БМ}$ – витрати на виробництво біометану, грн; $V_{БМ}$ – об'єм одержаного біометану, m^3 ; $C_{БМ}$ – виробнича собівартість біометану, грн/ m^3 ; $m_{ГН}$ – маса рідкого гною, що надходить на зброджування, т; $m_{ОД}$ – маса органічних добрив, отриманих після зброджування, т; $m_{ПБ}$ – маса переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т; $Ц_{ГН}$ – ціна рідкого гною, грн/т; $Ц_{ОД}$ – ціна органічних добрив, грн/т; $E_{ВБМ}$ – виробничі витрати на виробництво біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн; $E_{БМ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво біометану, грн/ m^3 ; $V_{ПБ}$ – об'єм переробленої в біогазовому реакторі біомаси, m^3 ; $\rho_{ПБ}$ – густина переробленої в біогазовому реакторі біомаси, т/ m^3 ; V_p – об'єм біомаси в біогазовому реакторі, m^3 ; $\tau_{ЗБ}$ – час утримання біомаси в реакторі під час зброджування, діб; $k_{БМ}$ – вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора, m^3/m^3 добу; $A_{БМ}$ – амортизаційні витрати на виробництво біометану, грн/ m^3 .

Подальша деталізація виразу (37), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво біометану, дозволяє записати:

$$C_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}}(Ц_{ГН} - Ц_{ОД}) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ})(ТОР_{БМ} + ЕЛ_{БМ} + ЗП_{БМ}), \quad (40)$$

де $k_{ЗВ}$ – коефіцієнт, що враховує загальновиробничі витрати, відносних од.; $k_{ЗГ}$ – коефіцієнт, що враховує загальногосподарські витрати, відносних од.; $ТОР_{БМ}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництвом біометану, грн/ m^3 ; $ЕЛ_{БМ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві біометану, грн/ m^3 ; $ЗП_{БМ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві біометану, грн/ m^3 .



Враховавши відносну постійність деяких складових виразу (40) можна записати:

$$C_{БМ} = a_{БМ} \delta \Pi_{ОД} + bE_{БМ}, \quad (41)$$

де $a_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}}$ – потреба в біомасі для отримання 1 м³ біометану за час

зброджування, т/м³; $\delta \Pi_{ОД}$ – різниця ціни отриманих органічних добрив та гною,

що надходить на зброджування, грн/т; $b = 1 + k_{ЗБ} + k_{ЗГ}$ – коефіцієнт, що враховує

загальновиробничі та загальногосподарські витрати, відносних од.; $E_{БМ} = \text{ТОР}_{БМ} + \text{ЕЛ}_{БМ} + 3\Pi_{БМ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво біометану без урахування вартості органічних добрив, грн/м³.

Витрати на виробництво електроенергії на основі біометану включають виробничі витрати на одержання біометану та електроенергії за вирахуванням перевищення вартості органічних добрив над вартістю гною:

$$B_{ЕЛ} = W_{ЕЛ} C_{ЕЛ} = m_{ГН} \Pi_{ГН} - m_{ОД} \Pi_{ОД} + E_{ВЕЛ}, \quad (42)$$

звідки виробнича собівартість виробництва електроенергії на основі біометану, з урахуванням того, що $m_{ГН} \approx m_{ОД} = m_{ПБ}$, становить:

$$\begin{aligned} C_{ЕЛ} &= \frac{m_{ПБ}}{W_{ЕЛ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ} = \frac{V_{ПБ} \rho_{ПБ}}{W_{ЕЛ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ} = \\ &= 365 \frac{V_{ПБ} \rho_{ПБ}}{W_{ЕЛ} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ}, \end{aligned} \quad (43)$$

а враховавши, що

$$W_{ЕЛ} = \frac{V_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г}}{3,6}, \quad (44)$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} C_{ЕЛ} &= 365 \frac{3,6 V_{ПБ} \rho_{ПБ}}{V_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ} = \\ &= \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (\Pi_{ГН} - \Pi_{ОД}) + E_{ЕЛ}, \end{aligned} \quad (45)$$

а перевищення ціни органічних добрив над ціною гною для забезпечення нульової собівартості електроенергії на основі біометану становитиме:

$$\Pi_{ОД} - \Pi_{ГН} = \frac{E_{ЕЛ} k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}{3,6 \rho_{ПБ}}, \quad (46)$$



або з урахуванням амортизаційних витрат:

$$C_{ОД} - C_{ГН} = \frac{(E_{ЕЛ} + A_{ЕЛ}) k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}{3,6 \rho_{ПБ}}, \quad (47)$$

де $V_{ЕЛ}$ – витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн; $W_{ЕЛ}$ – кількість виробленої електроенергії, кВт год.; $C_{ЕЛ}$ – виробнича собівартість електроенергії, грн/кВт год.; $E_{ВЕЛ}$ – виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану без урахування вартості рідкого гною та органічних добрив, грн; $E_{ЕЛ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.; $q_{БМ}$ – теплотворна здатність біометану, МДж/м³; $\eta_{Г}$ – коефіцієнт корисної дії дизель-генератора при отриманні електроенергії, відн. од.; 3,6 – коефіцієнт перерахунку, МДж/кВт год.; $A_{ЕЛ}$ – амортизаційні витрати на виробництво електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.

Подальша деталізація виразу (45), шляхом розкриття структури питомих виробничих витрат на виробництво електроенергії на основі біометану, дозволяє записати:

$$C_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}} (C_{ГН} - C_{ОД}) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ}) (ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}), \quad (48)$$

де $ТОР_{ЕЛ}$ – відрахування на технічне обслуговування і ремонт біогазової установки з виробництвом електроенергії, грн/кВт год.; $ЕЛ_{ЕЛ}$ – вартість витраченої електричної енергії при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.; $ЗП_{ЕЛ}$ – фонд заробітної плати з нарахуваннями при виробництві електроенергії на основі біометану, грн/кВт год.

Враховавши відносну постійність деяких складових виразу (48) можна записати:

$$C_{ЕЛ} = a_{ЕЛ} \delta C_{ОД} + b E_{ЕЛ}, \quad (49)$$

де $a_{ЕЛ} = \frac{3,6 \rho_{ПБ}}{k_{БМ} q_{БМ} \eta_{Г} \tau_{ЗБ}}$ – потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування, т/кВт год.; $E_{ЕЛ} = ТОР_{ЕЛ} + ЕЛ_{ЕЛ} + ЗП_{ЕЛ}$ – питомі виробничі витрати на виробництво електроенергії на основі біометану без урахування вартості органічних добрив, грн/кВт год.

Значення коефіцієнтів, що обумовлюють ефективність виробництва біометану та електроенергії на його основі, приведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Значення коефіцієнтів для розрахунку собівартості виробництва біометану та електроенергії на його основі

Показник	Позначення	Значення
Потреба в біомасі для отримання 1 м ³ біометану за час зброджування, т/м ³	$a_{БМ}$	53,2
Потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування, т/кВт год.	$a_{ЕЛ}$	13,6
Коефіцієнт, що враховує загальнопромислові та загальногосподарські витрати, відн. од.	B	1,15



За технічними і вартісними показниками обертових (потужність від 10 до 80кВт) та ємнісних (потужність від 100 до 500 кВт) біогазових установок, що пропонуються на ринку в Україні, нами визначено питомі виробничі витрати на виробництво біометану та електроенергії на його основі, без урахування вартості органічних добрив. Характерна залежність зміни величини виробничих витрат від потужності біогазових установок для умов 2011 року (вартість електроенергії 0,73 грн/кВт год. [14], середньомісячна зарплата 1853 грн/міс. [15]) наведена на рис. 21, а залежність терміну окупності біогазових установок різних типів, без урахування вартості органічних добрив, на рис. 22.

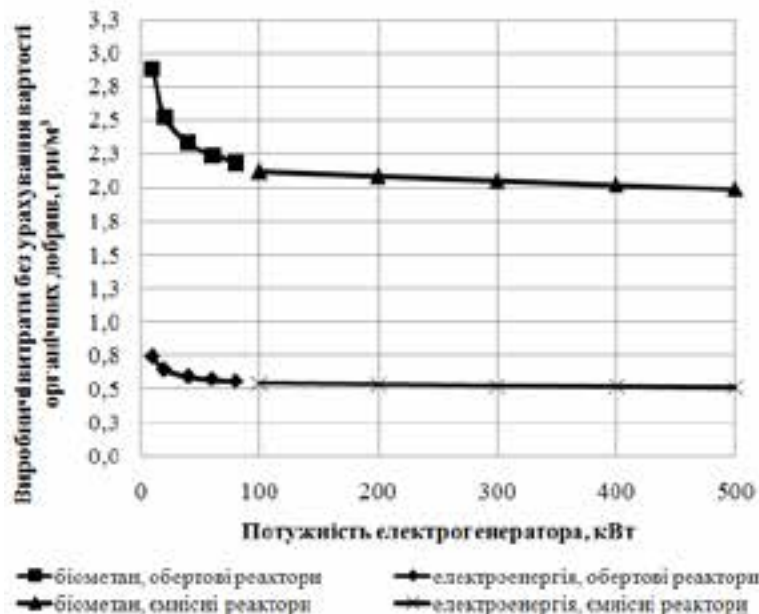


Рис. 21 Залежність виробничих витрат на виробництво біометану та електроенергії на його основі, без урахування вартості органічних добрив від потужності електрогенератора

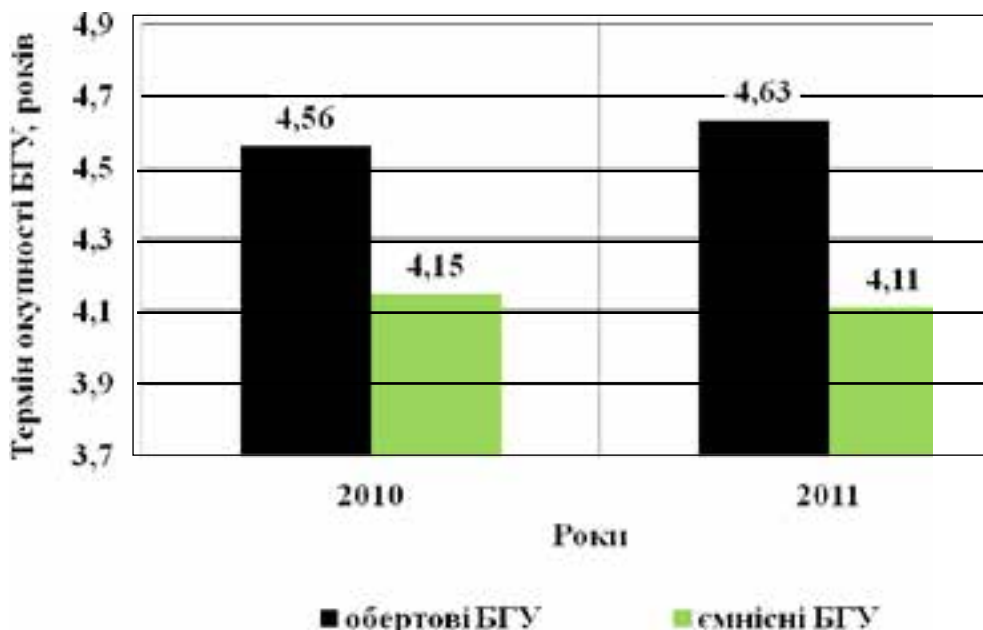


Рис. 22 Залежність терміну окупності біогазових установок різних типів, без урахування вартості органічних добрив



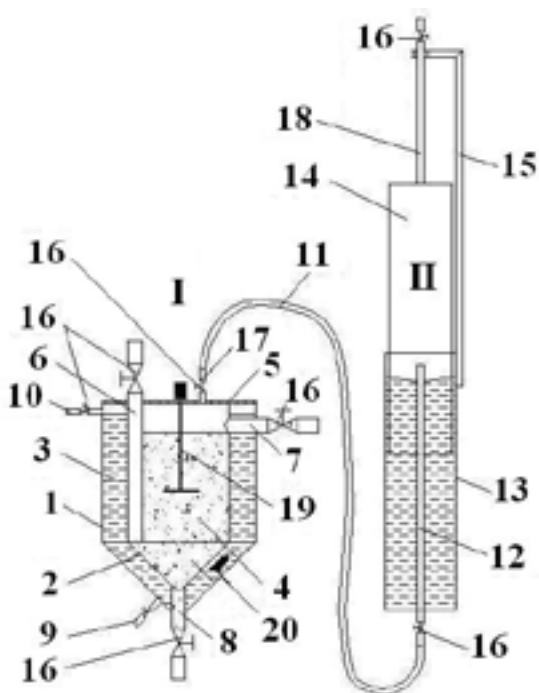
Таким чином, собівартість виробництва біометану без урахування вартості органічних добрив знаходиться в межах від 2,19 до 2,89 грн/м³ для біогазових установок з обертовими реакторами та від 1,99 до 2,12 грн/м³ для біогазових установок з ємнісними реакторами. Собівартість виробництва електроенергії на основі біометану знаходиться в межах від 0,56 до 0,74 грн/кВт год. для біогазових установок з обертовими реакторами та від 0,51 до 0,54 грн/кВт год. для біогазових установок з ємнісними реакторами.

Перевищення ціни органічних добрив на виході з біогазової установки над ціною гною на вході в установку, для забезпечення нульової собівартості біометану та електроенергії на його основі, знаходиться в межах від 61 до 78 грн/т. Нагальним є також необхідність підсилення економічних механізмів інвестиційної підтримки сільськогосподарських підприємств, які впроваджують біогазові установки для виробництва біометану та електроенергії.

11. ЛАБОРАТОРНА БІОГАЗОВА УСТАНОВКА

Лабораторна біогазова установка складається із метантенка I і газгольдера II.

Метантенк I складається із зовнішнього 1 і внутрішнього 2 (об'ємом 29 л) корпусів (рис. 23), між якими міститься водяна рубашка 3 – місткість, що наповнюється водою через трубу 9 і служить для передачі тепла від нагрівача 20 до біомаси, що міститься в активній зоні метантенка 4, і виступає в якості теплоізолятора активної зони біореактора від зовнішнього середовища. Температура води за допомогою електронагрівача 20 та системи керування температурним процесом підтримується в межах 35-45°C. Ця температура є оптимальною з точки зору протікання процесу метанової ферментації та енергетичних затрат біореактора. При заливанні води у водяну рубашку, повітря стравлюється через трубу 10 і вентиль 16. Для створення герметичності активної зони метантенка 4, зверху його накривають кришкою 5 із ущільнювачем.



I – метантенк; II – газгольдер; 1 – зовнішній корпус метантенка; 2 – внутрішній корпус метантенка; 3 – водяна рубашка; 4 – активна зона метантенка; 5 – кришка; 6 – труба для подачі біомаси; 7 – труба для зливання шламу; 8 – труба для видалення шламу; 9 – труба для подачі води; 10 – труба для встановлення рівня води у водяній рубашці; 11 – газопровід; 12 – трубка для подачі біогазу; 13 – корпус газгольдера; 14 – циліндр-рівнемір; 15 – направляюча; 16 – кран; 17 – трубка для відведення біогазу з активної зони метантенка; 18 – трубка для відбору газу із газгольдера; 19 – мішалка; 20 – нагрівач

Рис. 23 Принципова схема біогазової установки

[41]



Через трубу 6 в активну зону метантенка 4 заливається біомаса в напіврідкому вигляді (наприклад, гноївка, суміш харчових відходів, трави з водою тощо). Труба 6 доходить майже до дна активної зони біореактора 4, тому свіжа біомаса подається в нижню частину активної зони реактора, тим самим витісняючи біомасу, що перебродила (шлам), через трубу 7. Для незмінності мікрофлори комплексу метаноутворюючих бактерій при заправці метантенка необхідно залишити в ньому не менше 1/3 старої біомаси, що дасть можливість швидкого розмноження мікроорганізмів. Для зливання всієї біомаси при технічному обслуговуванні метантенка служить труба 8. Герметичність метантенка забезпечують вентилі 16. У реакторі при створенні оптимальної кислотності та температури та за умов відсутності кисню відбувається метанове бродіння, під час якого утворюється цінне органічне добриво та виділяється біогаз. Для запобігання утворення кірки, забезпечення однорідності біомаси, застосовується мішалка 19, яка періодично перемішує біомасу в активній зоні реактора.

Біогаз із реактора через трубку 17 по газопроводу 11 і далі по трубі 12 поступає в газгольдер II, де і зберігається. В цій установці застосовується «мокрый» газгольдер, який складається з двох порожнистих циліндричних місткостей: корпусу 13 і циліндра-рівнеміра 14, а також направляючої 15. Корпус газгольдера 13 наповнений водою, в якій як поплавок плаває порожнистий циліндр-рівнемір 14. Біогаз через трубку 12 поступає у внутрішню порожнину циліндра-рівнеміра 14, який в міру наповнення біогазом за направляючою 15 піднімається над корпусом газгольдера, що дає змогу визначати наявність та об'єм газу в газгольдері II. Із газгольдера біогаз відводиться по трубці 18 через кран 16 шляхом його видавлювання масою циліндра-рівнеміра 14.

Біомаса в напіврідкому вигляді (наприклад, гноївка, суміш харчових відходів, трава з водою тощо) заливається через трубу 6 в активну зону метантенка 4. Труба 6 доходить майже до дна активної зони реактора 4, тому біомаса подається в нижню частину активної зони реактора, витісняючи біомасу (шлам), що перебродила, через трубу 7. При заправці для підтримання мікрофлори, що утворює метан, необхідно залишити в реакторі не менше 1/3 відпрацьованої біомаси, що сприятиме швидкому розмноженню бактерій. При проведенні технічного обслуговування реактора біомасу зливають через трубу 8. Герметичність метантенка забезпечують вентилі 16. Для запобігання утворенню кірки та забезпечення однорідності біомаси шляхом періодичного її перемішування в активній зоні реактора застосовується мішалка 19.

При створенні в реакторі оптимальної кислотності та температури за умов відсутності кисню відбувається метанове бродіння, під час якого утворюється біогаз та якісне органічне добриво. Біогаз із реактора через трубку 17 по газопроводу 11 і далі по трубі 12 надходить у газгольдер II, де і зберігається. В цій установці застосовується «мокрый» газгольдер, який складається з двох порожнистих циліндричних місткостей: корпусу 13 і циліндра-рівнеміра 14, а також направляючої 15. Корпус газгольдера 13 заповнений водою, в якій, як поплавок, плаває порожнистий циліндр-рівнемір 14. Біогаз через трубку 12 поступає у внутрішню порожнину циліндра-рівнеміра 14, який за направляючою 15, у міру наповнення біогазом, піднімається над корпусом газгольдера, що дає змогу визначати наявність та об'єм газу в газгольдері. Із газгольдера біогаз відводиться по трубці 18 через кран 16 шляхом його витіснення циліндром-рівнеміром 14 [41].



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які існують способи розкладання відходів?
2. Що таке біогаз? Завдяки якому процесу він утворюється?
3. Чим біогаз відрізняється від природного газу?
4. З якої сировини може вироблятися біогаз?
5. Охарактеризуйте сучасний стан біогазових технологій.
6. Чому виробництво біогазу є однією з безвідходних технологій?
7. Охарактеризуйте мікробіологічні основи процесу виробництва біогазу.
8. Скільки груп бактерій бере участь у виробництві біогазу? Назвіть їх.
9. Дайте класифікацію метаноутворюючим бактеріям за температурним режимом.
10. Які два основні види підготовки і бродіння сировини використовуються у біогазових технологіях?
11. Які основні елементи конструкції мають твердофазні біогазові установки?
12. Які основні показники твердофазного бродіння в існуючих біореакторах?
13. Чим обумовлена низька ефективність процесу виділення метану під час твердофазного бродіння?
14. Охарактеризуйте першу та другу стадії анаеробного зброджування.
15. Який масовий вихід метану та вуглекислого газу під час анаеробної ферментації 1 кг органічної речовини?
16. Який основний напрям інтенсифікації процесу рідкофазного зброджування біомаси гною?
17. В яких межах повинна бути вологість біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
18. Чим обумовлена нижня межа вологості біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
19. Чим обумовлена верхня межа вологості біомаси при використанні рідкофазного анаеробного зброджування?
20. Які основні елементи конструкції мають рідкофазні біогазові установки?
21. Які основні недоліки рідкофазних біогазових реакторів?
22. Які існують способи завантаження субстрату в метантенк? Охарактеризуйте їх.
23. Які основні типи мішалок використовуються для перемішування біомаси при рідкофазному анаеробному зброджуванні?
24. Який вихід біогазу можна отримати з 1 т біомаси при рідкофазному анаеробному зброджуванні?
25. Який питомий вихід біогазу мають сучасні рідкофазні біогазові установки?
26. Який максимальний рівень розкладу органічної біомаси під час рідкофазного анаеробного зброджування?
27. Дайте характеристику лаг-фази, логарифмічної фази, фази уповільнення росту, фази відмирання.
28. Що таке косубстрати і який вплив вони здійснюють на вихід біогазу?
29. Як різні види субстрату впливають на вихід біогазу?
30. Як визначається потужність, яка споживається привідним електродвигуном обертового



- біогазового реактора із електричної мережі?
31. Які є методи зниження споживаної потужності на обертання занурених реакторів?
 32. Поясніть вплив коефіцієнта занурення заповненого обертового метантенка на потужність приводного механізму.
 33. Чим обумовлено коливання споживаної електричної потужності під час роботи обертового реактора
 34. Як перемішування впливає на вихід біогазу?
 35. Які основні елементи конструкції біогазової установки?
 36. Які основні методи зниження витрат енергії при роботі біогазової установки?
 37. Яка роль інокуляції біомаси при роботі біогазової установки?
 38. Розкажіть про будову та принцип роботи біогазової установки.
 39. Що таке метантенк? Для чого він призначений?
 40. Які існують види метантенків?
 41. Що таке газгольдер? Для чого він призначений?
 42. Які існують види газгольдерів?
 43. Як визначити виробничу собівартість виробництва біометану?
 44. Який основний технологічний показник виробництва визначає економічну ефективність виробництва біометану?
 45. Як визначити виробничу собівартість виробництва електроенергії на основі біометану?
 46. Який показник дизель-генератора визначає економічну ефективність виробництва електроенергії на основі біометану?
 47. Яка потреба в біомасі для отримання 1 м³ біометану за час зброджування?
 48. Яка потреба в біомасі для отримання 1 кВт год. електроенергії за час зброджування?
 49. Яка собівартість виробництва біометану без урахування вартості органічних добрив?
 50. Яка собівартість виробництва електроенергії на основі біометану?
 51. Який орієнтовний термін окупності біогазових установок?
 52. Які основні передумови зі сторони державних органів для збільшення інвестицій у будівництво біогазових установок?
 53. Розкажіть про принцип роботи лабораторної біогазової установки.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біопалива (технології, машини і обладнання) / [В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло, О. Шептицький, А. Рожковський, З. Пасторек, А. Гжибек, П. Євич, Т. Амон, В.В. Криворучко] – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 137 с.
2. Пальгунов П.П. Утилизация бытовых отходов / П.П. Пальгунов, М.В. Сумарохов. – М.: Стройиздат, 1990. – 352 с.
3. Хажмурадов М.А. Установка та технологія по утилізації біогазу / Хажмурадов М.А. // Наука та інновації. – 2006. – № 4. – С. 19.
4. Богоявленский Р.Г., Рыжов В.А. Мировые тенденции в области современных технологий утилизации твердых промышленных и бытовых отходов / Богоявленский Р.Г., Рыжов В.А. – М.: ЭКОС, 2000. – С. 42–51.
5. Патент на винахід №0239209 США. Combined installation for the production of biogas and compost, and method of switching a fermenter in a like installation between biogas production and composting / Peter Lutz; патентовласник ВЕКОН Energy Technologion GmdH Co. KG. – №12/408573; заявл. 20.03.2009.
6. www.weltec-biopower.de.
7. Бобович Б.Б. Переработка отходов производства и потребления / Бобович Б.Б., Девяткин В.В. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 496 с.
8. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. / Под ред. С. Соуфера, О. Забарски. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
9. Экологическая биотехнология: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А. Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1987. – 384 с.
10. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. / Кухлинг Х. // 2-е изд. – М.: Мир, 1985. – 520 с.
11. Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.
12. Технічне забезпечення виробництва біогазу / [Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Рубан Б.О., Войтенко В.О.]: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – 186 с. – С. 17–19.
13. В. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / [Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б., Єрмоленко]: Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18–21.
14. Національна комісія регулювання електроенергетики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nerc.gov.ua/control/uk/publish/article/main?art_id=34197&cat_id=27394.
15. Сільське господарство України. Стат. зб.; за ред. Ю.М. Остапчука. – К.: Державна служба статистики України, 2011. – 370 с.
16. [Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Zollitsch W., Mayer K., Buga S., Amid A.] (2004): Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. In: Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs: 54. Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft, Höhere Bundeslehranstalt für alpenländische Landwirtschaft: «Züchertagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs», 25. bis 27. November 2003, Raumberg/Trautenfels.
17. [Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Buga S., Mayer K., Zollitsch W., Pötsch E.] (2003):



- Biogas aus Klee gras, Feldfutter- und Dauerwiesenmischungen. Der fortschrittliche Landwirt, 22, 52–53.
18. Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли: Пер. с англ. А.С. Калянского. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.
 19. Огороднік А.І. Кінетична модель процесу компостування субстрату у рибництві / Огороднік А.І., Голуб Г.А. // Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Механізація та електрифікація сільського господарства». – К. – 1997. – Вип. 82. – С. 67–70.
 20. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств / Холькин Ю.И. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 496 с.
 21. Голуб Г.А. Досвід виробництва і використання біогазу в Республіці Польща / Г.А. Голуб, С.В. Лук'янець // Економіка АПК. – 2011. – № 11. – С. 157–160.
 22. Дубровин В.А., Мельничук М.Д., Голуб Г.А., Таргоня В.С. Концептуальные аспекты комплексного технического обеспечения экологически безопасного производства органических продуктов. Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Международной научно-технической конференции (Минск, 19-20 октября 2011 г.). В 3 т. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2011. – Т. 1. – С. 50–57.
 23. Голуб Г.А., Дубровин В.А. Проблемы технико-технологического обеспечения энергетической автономности агроэкосистем. Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Международной научно-технической конференции (Минск, 19-20 октября 2011 г.). в 3 т. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2011. – Т. 1. – С. 39–45.
 24. Голуб Г.А., Таргоня В.С. Технічне забезпечення органічного виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив / Г.А. Голуб, В.С. Таргоня // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві. – Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2011. – Вип. 2(8). – 239 с. – С. 66–73.
 25. Аналіз метаноутворення в біогазових установках / [Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Войтенко В.О., Гох В.В.]: – Сучасні проблеми збалансованого природокористування: Збірник наукових праць / Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ); Науковий редактор: Бахмат М.І. – Кам'янець-Подільський, 2012. – Спеціальний випуск до VII науково-практичної конференції. – 334 с. – С. 141–145.
 26. Кухарець С.М. Забезпечення енергетичної автономності агроекосистем на основі виробництва біопалива / С.М. Кухарець, Г.А. Голуб // Науково-теоретичний збірник «Вісник Житомирського національного агроекологічного університету» / Головний редактор: Микитюк В.М. – Житомир, 2012. – №1 (30), т. 1. – 468 с. – С. 345–352.
 27. Голуб Г.А. Кінетика анаеробної ферментації рослинної біомаси / Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК / Редколегія: Д.О. Мельничук (відповідальний редактор) та інші. – К., 2013. – Вип. 185, ч. 2. – 395 с. – С. 296–301.
 28. Голуб Г.А., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. Метантенк: Патент на винахід 74718. Україна. МПК С02F11/04. – Заявка № 20040503534; Заявлено 12.05.2004; Опубліковано 16.01.2006, Бюл. № 1. – 5 с.
 29. Лінник М.К., Мельничук М.Д., Дубровін В.О., Голуб Г.А., Таргоня В.С., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. Метантенк: Патент на винахід 81154. Україна. МПК С02F11/04. – Заявка № а200511162; Заявлено 25.11.2005; Опубліковано 10.12.2007, Бюл. № 20. – 3с.



30. Голуб Г.А., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. Метантенк: Патент на винахід 89305. Україна. МПК C02F11/04, C02F3/28. – Заявка № а200808070; Заявлено 13.06.2008; Опубліковано 11.01.2010, Бюл. № 1. – 4 с.
31. Голуб Г.А., Рубан Б.О., Дубровіна О.В. Метантенк: Патент на винахід 97995. Україна. МПК C02F11/04, C02F3/28, C02F3/06, C12P5/00. – Заявка № а201002089; Заявлено 25.02.2010; Опубліковано 10.04.2012, Бюл. № 7. – 5 с.
32. Голуб Г.А., Дубровіна О.В., Маєвська А.Г, Рубан Б.О. Метантенк: Патент на винахід 101226. Україна. МПК C02F11/04, C02F3/28. – Заявка № а201106300; Заявлено 19.05.2011; Опубліковано 11.03.2013, Бюл. № 5. – 6 с.
33. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнев, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець. – К: «Аграр Медіа Груп», 2012. – 244 с.
34. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнев, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець. – К: «Аграр Медіа Груп», 2011. – 612 с.
35. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуша, І.П. Григорюк, В.О. Дубровін, А.І. Ємець, Г.М. Забарний, Г.М. Калетнік, М.Д. Мельничук, В.Г. Мироненко, Д.Б. Рахметов, С.П. Циганков – К: «Аграр Медіа Груп», 2010. – 360 с.
36. Поліщук В.М. Біотехнологічні основи виробництва біогазу / В.М. Поліщук, М.М. Лободко, О.В. Дубровіна //Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: Зб. наук. праць. - Київ, 2013. - № 185. Ч. 2 - С. 289-296.
37. Поліщук В.М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу / В.М. Поліщук, М.М. Лободко, О.В. Сидорчук, О.В. Поліщук//Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: Зб. наук. праць. - Київ, 2013. - № 185. Ч. 3 - С. 180-191.
38. Поліщук В.М. Поступова подача субстрату в біогазовий реактор/В.М. Поліщук, В.О. Дубровін, М.М. Лободко, Д.Ю. Ляшко // Науковий огляд. - № 7(8). - К.: ТОВ «ТК Меганом», 2014. -С. 45-51.
39. Полищук В.Н. Исследование процесса постепенной подачи субстрата в метантенк биогазовой установки/В.Н. Полищук, В.А. Дубовин, А.В. Полищук// Труды международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». - Т. 4. - 2014. - С. 265-269.
40. Полищук Виктор. Влияние режимов метанового сбраживания на эффективность производства биогаза / Виктор Полищук, Николай Лободко, Ольга Дубровина// MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. - Lublin - Rzeszow, 2013. -Vol. 15, No 3. - С. 207-220.
41. Процеси та апарати біотехнологічних виробництв. Частина 1. Установка для одержання біогазу. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін «Процеси та апарати біотехнологічних виробництв» для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів 3-4 рівнів акредитації освітньо-кваліфікаційного рівня „Магістр” зі спеціальності 8.10010203 - “Механізація сільського господарства”/В.М. Поліщук, В.О. Дубровін, С.В. Драгнев, М.М. Лободко, О.В. Дубровіна. - К.: АграрМедіаГруп, 2013. -16 с.

Видавець і виготовлювач Національний університет
біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №4097 від 17.06.2011