

### 3.7. Ефективність та перспективи розвитку біогазової енергетики в Україні в постковідний період

Зростаючий дефіцит паливних ресурсів висуває на перший план гостру необхідність пошуку альтернативних джерел енергії, бажано, відновлюваних, до яких належить біогаз – суміш з 65% метану, 30% вуглекислого газу, 1% сірководню, а також домішок азоту, кисню, водню і чадного газу [5]. В  $1 \text{ м}^3$  біогазу міститься енергія, еквівалентна  $0,6 \text{ м}^3$  природного газу, або 0,74 і 0,66 літри нафти чи дизельного палива, відповідно.

Сучасні методи дозволяють переробляти на біогаз будь-які види органічної сировини, від якої напряму будуть залежати його кількісно-якісні характеристики. Основні положення отримання біогазу були розроблені такими вченими як: Амерханов Р.А., Андрюхин Т.Я., Гришаев І.Д., Ковальов А.А., Мельник Р.А., та інші, а також зарубіжними вченими: Баадер В., Беккер М., Блумберг Д., Дубровскіс В., Лінке Б., Павличенко В.П., Розенвінкель К., Смирнов О.П., Упітса А.А., Федотов В. М. та ін. Питаннями підвищення енергетичної ефективності процесів виробництва та використання біологічних видів палива, а також розробкою методів та технологій отримання і спалювання біогазових сумішей займалися такі науковці, як: Басок Б. І., Гелетука Г. Г., Голуб Г. А., Голуб Н. Б., Головка В. М., Губинський М. В., Дубровін В. О., Качан Ю. Г., Кудря С. О., Кухарець С. М., Степанов Е. М., Эдер Б., Denis O., Montgomery L., Perez V., Reyes A. та інші.

Біогазові технології – це комплекс технічних та технологічних систем із виробництва, транспортування, зберігання, обробки та використання біогазу із застосуванням сучасного обладнання та новітніх підходів та рішень [6]. Даний напрямок – енергоефективна переробка органічної сировини та різноманітних відходів, як джерела утворення біогазу, та заміщення останнім традиційних енергоресурсів.

Розкладання біомаси відбувається внаслідок хіміко-фізичних процесів і в результаті життєдіяльності трьох груп бактерій, при цьому продукти метаболізму одних є основою для живлення інших у визначеній неперервній послідовності: I група - гідролізні, II - кислотоутворюючі, III - метаноутворюючі бактерії.

В якості сировини для виробництва біогазу можуть бути використані як органічні побутові чи промислові та аграрні відходи,

так і сировина рослинного походження – кукурудзяний, трав'яний та силос злакових культур. Найбільш прийнятними для виробництва біогазових сумішей видами відходів агропромислового сектору є: гній великої рогатої худоби та свиней, послід птиці; бадилля різноманітних овочевих культур; відходи з цукрових буряків, фруктів та овочів, кукурудзи; жом і меляса; спиртова барда; пивна дробина, солодові паростки, відстій білковий; відходи крохмально-патокового виробництва; сироватка.

Біогаз виникає в результаті анаеробного бродіння у відповідному температурному режимі майже будь-яких видів органічної сировини та біомаси. В складі біогазу міститься значна кількість метану ( $\text{CH}_4$ ), що відносить його до класу горючих газів [6].

Існують три основні технології виробництва цього енергоресурсу [7]:

1. Мікробіологічна ферментація органічного матеріалу з низьким вмістом лігноцелюлозних комплексів (ЛЦК), в основному, з органічної сировини та відходів аграрного сектору та промисловості, органічної фракції твердих побутових відходів (ТПВ), стічних вод та осадів в контрольованих умовах біоферментації у спеціальних реакторах.

2. Збір біогазу за допомогою спеціального обладнання та устаткування на полігонах та звалищах ТПВ.

3. Газифікація та метанізація біомаси (з високим вмістом ЛЦК, переважно деревини), з отриманням синтез-газу (суміш водню, оксидів вуглецю та метану). Ця технологія знаходиться на стадії досліджень та пілотних проектів.

Для різних джерел виробництва кількісно-якісна характеристика виходу біогазу може значно відрізнятись. Інформація про найпоширеніші джерела біологічної сировини [8] наведена в табл. 3.9.

Крім метану, в сирому біогазі містяться також інші важливі компоненти, об'ємні концентрації яких наступні: вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ : до 50%), азот ( $\text{N}_2$ : до 5%), кисень ( $\text{O}_2$ : до 2%), водень ( $\text{H}_2$ : до 2%), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ : до 1,5%). Також в незначній кількості можуть спостерігатись у складі водяна пара, вищі гідрокарбонати, силосани та хлор [7]. Склад сирого біогазу залежить також не тільки від виду сировини, але й технології його виробництва.

Таблиця 3.9

Показники якості і кількості біогазу, що утворюється з різних органічних відходів

Категорія сировини	Питомий вихід біогазу, м <sup>3</sup> /т	Вміст метану в біогазі, %
Коров'ячий гній	39 - 55	60 - 64
Свинячий гній	49 - 57	61 - 65
Пташиний послід	46 - 108	59 - 63
Силос кукурудзяний	210 - 400	52 - 59
Пивна дробина	59 - 98	50 - 65
Овочеві відходи	330 - 500	45 - 65
Відходи скотобійні	240 - 510	47 - 54
Стічні води	70 - 100	45 - 60
Тверді побутові відходи	100 - 180	45 - 53
Жирова тканина	1250 - 1300	54 - 70

Головними джерелами біогазового палива для потреб промисловості можуть стати полігони ТПВ й стічні води, а також біоконвертовані гній й промислові органічні відходи. Типовий склад біогазу відповідно до кожного з цих видів сировини наведено в табл. 3.10 [8].

Таблиця 3.10

Типовий об'ємний склад біогазу

Компонент	Одиниця вимірювання	Стічні води та тверді побутові відходи	Гній та органічні відходи
Метан	%	45 - 60	55 - 70
Двоокис вуглецю		25 - 50	25 - 45
Водень		0 - 3	0 - 1
Азот		2 - 10	0 - 1
Кисень		0 - 3	0 - 0,5
Сірководень		0 - 1	0,2 - 1,5
Вищі гідрокарбонати		< 0,5	< 0,5
Силоксани		< 0,2	0
Оксид вуглецю		< 0,5	0

Як видно з табл. 3.10, в біогазі в різних кількостях можуть знаходитись основні компоненти. Важливою відмінністю біогазу, зібраного на полігонах ТПВ та отриманого з осаду стічних вод, є ймовірність підвищеного вмісту в ньому баластних домішок, таких як

азот та вуглекислий газ, а вміст метану в середньому становить лише половину об'єму газової суміші.

В свою чергу, біогаз з гною та органічних відходів відрізняється вищою калорійністю, проте також підвищеним вмістом сірководню. Як видно, яким би не було джерело походження біогазових сумішей, цьому енергоресурсу притаманний значний недолік у вигляді шкідливих домішок у його складі.

Багато країн, у тому числі й Україна, мають істотний потенціал для виробництва біогазу із відходів сільськогосподарських тварин. Відсутність узагальнених даних про баланси енергії біогаз-заводів і методів економічної оцінки не дає можливості об'єктивно оцінити її виробництво, стримує залучення в народне господарство величезного потенціалу енергії відходів тваринницьких ферм. Теоретичні і експериментальні дослідження підтвердили, що використання біогазу як додаткового, поновлюваного і екологічно чистого джерела енергії при певних умовах може стати дуже перспективним. Економічна та екологічна вигода від використання біогазу, полягає в збереженні традиційних викопних природних ресурсів та скороченні забруднення довкілля. Якщо наприкінці 2014 р. в країні було встановлено біогазових установок, які генерували електроенергію за «зеленим» тарифом, загальною потужністю 14 МВт, то станом на кінець січня 2018 р. ця цифра зросла до майже 40 МВт. Станом на кінець III кварталу 2019 р. в Україні потужність біогазових установок вже дорівнювала 70 МВт, зокрема: 47 МВт – на агровідходах; 23 МВт – сміттєзвалищах [9].

Серед успішних проектів впровадження біогазового обладнання на території України можна навести приклади діючих установок та таких, що плануються до введення найближчим часом, які представлені в табл. 3.11.

Потенціал продукування біогазу за типом підприємств та притаманним ним відходам виробництва наведено в табл. 3.12 [10].

Крім того, вона залежить як від обраної технології, матеріалів і конструкції основних їх елементів, так і від кліматичних умов у районах їх розташування. Середнє споживання виробленої енергії для забезпечення процесу в самому біореакторі у широтах України становить: теплової — 15 - 30%, й, додатково, електричної — 6 - 9 % [11]. При цьому після очищення біогазу від негорючих і шкідливих домішок його собівартість наближається до вартості природного, що може бути економічно недоцільним.

Таблиця 3.11

## Діючі біогазові установки в Україні

Підприємство / населений пункт, рік введення в експлуатацію	Об'єм біореактору, м <sup>3</sup>	Вид сировини, що переробляється	Об'єм сировини, т/добу	Генерована потужність, кВт	Постачальник обладнання
1	2	3	4	5	6
Свиноферма комбінату ПАТ «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, 1993	595	гній свиней	20 – 22	-	Bigadan Ltd, Данія
Свиноферма «Агро-Овен», с. Оленівка, Дніпропетровська обл., 2003	2×1000	гній свиней, жирові відходи	80	180	BTG, Нідерланди
Аграрна компанія «Еліта», с. Терезине, Київська область, 2009	1500	гній ВРХ та свиней	60	250	LIPP, ФРН
Ферма ВРХ «УМК», с. В. Крупіль, Київська область, 2009	3×2400 + 1000	гній ВРХ	400	955	«Зорг Биогаз», Україна
Птахофабрика «Орель-Лідер», с. Єлизаветівка, Дніпропетровська обл., 2012	10×3500	послід, силос кукурудзи	140, 80	5000	NVT, Нідерланди
Свинокомплекс компанії «Даноша», с. Копанки, Івано-Франківська обл., 2013	13000	гній свиней	400	1000	-
АФ «Астарта-Київ», Глобинський цукровий завод, Полтавська обл., 2013	2000	буряковий жом	56	-	-
Біогазовий комплекс с. Бзів, Київська обл., 2015	3630	гній ВРХ, силос кукурудзи	-	330	Ecodevelop, Україна
м. Вознесенськ, Миколаївська обл., 2009	-	силос	10	125	«Зорг», Україна
м. Підгородне, Дніпропетровська обл., 2013		гній свиней	40	125	
с. Рокитне, Львівська обл., 2015	3×8200 + 1×4000	жом цукрових буряків, гній ВРХ		2378	

1	2	3	4	5	6
смт. Теофіполь, Хмельницька обл., 2017, 2018		жом цукрових буряків	650	5100	
смт. Теофіполь, Хмельницька обл., 2017, 2018		силос кукурудзи	450	10500	
Корсунь- Шевченківський, 2019		жом цукрових буряків	400	7500	
Городище- Пустоваровське, 2019	2×3800 + 1×3800	жом цукрових буряків	355	2400	

Таблиця 3.12

## Економічно доцільний потенціал біогазу в Україні

Тип підприємства	Основний вид відходів	Вміст сухої речовини, %	Усього відходів, млн т/рік	Потенціал виробництва, млн. м <sup>3</sup> /рік
1	2	3	4	5
Тваринницькі ферми	Послід	10 – 12	20,5	719
Свиноферми	Послід	7 – 10	4,7	180
Птахофабрики	Послід	25 – 30	2,9	326
Пивоварні	Післяспиртов а барда	20 – 25	1,4	171
Цукрозаводи	Меляса	10 – 12	6,5	216
Спиртзаводи	Післяспиртов а барда	6 – 8	4,5	180
Переробка молока/виробництво сиру	Молочна сироватка	6 – 7	2,5	90
Енергетичні плантації	Силос кукурудзи	20 – 35	8,42	1610
Разом			43,9	3492

Відомо, що утворення біогазу відбувається при температурах від 0°C до 97°C і у цьому проміжку виділяють, умовно три температурні режими [12]: психрофільний (до 20 - 25°C), мезофільний (25 - 40°C) і термофільний (понад - 40°C). Перший спостерігається в установках без підігріву, в яких відсутній контроль за температурою, і найбільш значне газовиділення відбувається при 23°C. Другий і третій, для яких оптимальними є 34 - 37°C і 52 - 54°C, відповідно, притаманні для біогазових установок, що працюють на змішаній сировині

тваринного походження. При цьому, інтенсивність виділення метану збільшується із зростанням температури і обмежується утворенням в результаті зброджування вільного аміаку, що сповільнює процес.

Враховуючи зазначене, на практиці поширення набули саме останні режими, перевагою яких є підвищена швидкість розкладання сировини і більш високий вихід біогазу, а також практично повне знищення хвороботворних бактерій, що містяться в сировині, що дозволяє використовувати залишки субстрату у якості біологічних добрив. До їх недоліків слід віднести велику кількість енергії, яка потрібна для підігріву субстрату в реакторі, чутливість процесу зброджування до найменших змін температури і дещо нижча якість отримуваних біодобрив.

З енергетичної точки зору важлива тривалість технологічного циклу переробки біомаси, яка є визначальним фактором собівартості виробництва біогазу. В залежності від обраного температурного режиму і складу сировини повний час бродіння може перебувати в наступних інтервалах [12]: психрофільний (30 - 40 діб і більше), мезофільний (10 - 20 діб) і термофільний (5 - 10 діб). При цьому час нагрівання субстрату до необхідної температури, як правило, становить від 46 до 68 годин, а кількість спожитої енергії в цей період перевищує 50% від її загальної потреби на цикл.

Приблизні обсяги енергії на забезпечення процесу бродіння для конкретної установки можна оцінити за технічними характеристиками виробника зазначеного обладнання, представленими в документації, але за їх відсутності або з метою уточнення для певної місцевості ефективність непроточного біореактора можна встановити і за розрахунковим експериментом. В якості прикладу, за методикою [13] було визначено тепловий баланс метантенку, у якому цикл метаноутворення триває 19 діб при дотриманні термофільного режиму [14] та при типових кліматичних умовах північних регіонів України в зимовий період. Динаміку температури та питомий вихід біогазу на 1 кг сухої біомаси, що відповідають такому досліді, зображено на рис. 3.19.



Рис. 3.19. – Динаміка: а) температури в реакторі; б) виходу біогазу.

При цьому, для виробництва біогазу використано горизонтальний метантенк об'ємом  $10 \text{ м}^3$ . Коефіцієнти заповнення та спорожнення біореактора при поступовому його завантаженні приймалися  $q = 0,7$  та  $r = 1$ , відповідно. Середнє значення теплоємності субстрату  $C_{\text{суб}}$  становило  $4,18 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , а вологість гною великої рогатої худоби - 92%. Середньомісячна швидкість вітру для визначення коефіцієнту теплообміну на зовнішній поверхні метантенку прийнято  $2,6 \text{ м/с}$ . Матеріалом стінки є сталь товщиною  $\delta_{\text{ст}} = 7 \text{ мм}$  з коефіцієнтом теплопровідності  $52 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Для зменшення тепловтрат застосовано мінераловатні листи товщиною  $80 \text{ мм}$  з теплопровідністю  $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Тоді:

$$E_{\text{тм}} = E_n + E_{\delta}, \quad (3.5)$$

де:  $E_{\text{тм}}$ ,  $E_n$ ,  $E_{\delta}$  – витрати теплоти в метантенку і на нагрів субстрату до температури бродіння, втрати в навколишнє середовище, відповідно, МДж/добу.

Кількість теплоти, що витрачається на підігрів біомаси визначались як:

$$E_{\text{тм}} = m_{\text{суб}} \cdot C_{\text{суб}} \cdot (t_{\text{бр}} - t_{\text{бм}}), \quad (3.6)$$



де:  $m_{\text{суб}}$ ,  $C_{\text{суб}}$  – маса та теплоємність субстрату, кг та МДж/(кг·К), відповідно;

$t_{\text{бп}}$ ,  $t_{\text{бм}}$  – температура біомаси початкова та бродіння, °С.

Обсяги розсіювання енергії від метантенку в навколишнє середовище  $E_{\text{д}}$  розраховувались за формулою [14]:

$$E_{\text{д}} = 0,0036 \cdot k \cdot S_{\text{м}} \cdot (t_{\text{бп}} - t_{\text{д}}) \cdot \tau, \quad (3.7)$$

де:  $k$  – коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до навколишнього середовища, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S_{\text{м}}$  – контактна площа поверхні метантенку, м<sup>2</sup>;

$t_{\text{д}}$  – зовнішня температура, °С;

$\tau$  – час роботи обладнання на добу, год.

Тут  $k$  визначався як:

$$k = \frac{1}{(R_{\text{з}} + R_{\text{із}})}, \quad (3.8)$$

де:  $R_{\text{з}}$ ,  $R_{\text{із}}$  – термічний опір тепловіддачі зовнішньої поверхні і теплопровідності теплоізоляційного слою, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Термічний опір тепловіддачі  $R_{\text{з}}$  визначався за допомогою виразу:

$$R_{\text{з}} = \frac{1}{\alpha_{\text{з}}}, \quad (3.9)$$

де:  $\alpha_{\text{з}}$  – коефіцієнт теплообміну зовнішньої поверхні метантенку, Вт/(м<sup>2</sup>·К), який залежить також від швидкості вітру  $v_{\text{в}}$ , м/с:

$$\alpha_{\text{з}} = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{v_{\text{в}}}. \quad (3.10)$$

Термічний опір теплопровідності теплоізоляційного слою визначався за формулою:

$$R_{\text{із}} = \frac{\delta_{\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}} + \frac{\delta_{\text{ім}}}{\lambda_{\text{ім}}}, \quad (3.11)$$

де:  $\delta_{\text{см}}$ ,  $\delta_{\text{ім}}$  – товщина стінки та слою теплоізоляції метантенку, м;

$\lambda_{cm}, \lambda_{im}$  – коефіцієнти теплопровідності стінки і теплоізоляції, Вт/(м·К).

Оскільки формула для визначення залежності щільності гною  $\rho_z$  від його вологості має вигляд:

$$\rho_z = 1624 - 6,24 \cdot W_z, \quad (3.12)$$

то маса завантаженого субстрату в метантенк визначались як:

$$m = V_m \cdot r \cdot q \cdot \rho_z. \quad (3.13)$$

Результати зазначених розрахунків зведено до табл. 3.13. При цьому відсоток корисної енергії, який використовується на забезпечення власних теплових потреб, визначався як:

$$\eta = \frac{E_{mm}}{E_6} \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

де:  $E_6$  – енергія, що міститься в отриманому біогазі, Дж.

Отже, порівнявши енергію, яка використовується на власні потреби, і корисну, видно, що в умовах півночі України 35,93% виробленого біогазу витрачається на забезпечення необхідного температурного режиму в реакторі. А це є вкрай нераціональним і значно знижує ефективність використання біогазових технологій в цілому.

Використання технологій отримання біогазу з органічних відходів на основі анаеробного зброджування при виробництві сільськогосподарської продукції дозволяє вирішити не тільки екологічні проблеми тваринницьких підприємств, але й збільшити їх конкурентоспроможність та рентабельність за рахунок продукування високоякісних органічних добрив і біогазових сумішей, придатних для отримання теплової або електричної енергії [15]. Проте, не дивлячись на це, технологія анаеробного перетворення органічних енергоресурсів зазначених підприємств ще не знайшла широкого застосування, що пояснюється наступними чинниками: низькою ефективністю процесу метаноутворення і, як правило, високою вартістю обладнання для зброджування.

Таблиця 3.13

## Результати розрахунків енергетичного балансу

№ доби	Температура, °С	Питомий вихід біогазу, м <sup>3</sup> /кг	Енергія, що міститься в отриманому біогазі, ГДж	Енергія на власні потреби, ГДж	Корисна енергія, ГДж
1	10	0	0	3,085	-3,085
2	22	0,025	0,367	4,638	-4,270
3	35	0,1	1,47	5,039	-3,569
4	35	0,2	2,94	0,047	2,893
5	45	0,3	4,41	3,901	0,509
6	52	0,35	5,145	2,758	2,387
7	52	0,4	5,88	0,07	5,809
8	52	0,4	5,88	0,07	5,809
9	52	0,4	5,88	0,07	5,809
10	52	0,4	5,88	0,07	5,809
11	52	0,4	5,88	0,07	5,809
12	44	0,3	4,41	0,059	4,351
13	35	0,2	2,94	0,047	2,893
14	35	0,125	1,837	0,047	1,791
15	25	0,08	1,176	0,033	1,142
16	18	0,05	0,735	0,023	0,711
17	10	0,025	0,368	0,013	0,355
18	10	0,025	0,368	0,013	0,354
19	10	0,02	0,294	0,013	0,281
Σ		3,8	55,860	20,067	35,792

Доцільність впровадження біоенергоустановок в агропромисловий комплекс та їх ефективність пов'язана з необхідністю вирішення завдань інтенсифікації процесів генерації біогазових сумішей шляхом зброджування. Серед існуючих методів, можна виділити кілька груп щодо цього, зазначених в [16]: мікробіологічні та конструктивно - технологічні.

Підвищення енергоефективності процесу метанового зброджування за рахунок мікробіологічних методів може відбуватися провокуванням інтенсифікації життєдіяльності мікроорганізмів, зокрема, створенням штамів мікроорганізмів, які відрізняються високою активністю і вирощуються та культивуються в спеціальних пристроях для внесення безпосередньо у вигляді закваски в біоенергетичний реактор. Також, серед ефективних методів, що ґрунтуються на внутрішніх резервах одноклітинних, слід виділити:

створення специфічних добавок для внесення в субстрат, іммобілізація мікроорганізмів на носіях і спільне зброджування відходів рослинного і тваринного походження, тобто коферментації. Розглянемо їх більш детально.

*1. Мікробіологічні методи підвищення ефективності зброджування субстрату.*

*1.1. Коферментація.*

Як відомо, субстрат рослинного походження вигідно відрізняється від тваринного значно більшим потенціалом виходу біогазової суміші [17]. Цей факт можна пояснити наявністю більшої кількості різноманітних факторів зростання колонії, а саме: редукуючі цукри, амінокислоти тощо. Тому серед сучасних високоефективних шляхів підвищення обсягу та ефективності виходу біогазу є одночасне спільне зброджування зазначених типів сировини, тобто коферментація. Крім того, об'єм, динаміку та якість, тобто хімічний склад та вміст метану, в отриманому таким чином енергоресурсі, можливо визначити виключно експериментально через унікальність та індивідуальність чинників, притаманних різним агрогосподарствам.

*1.2. Модифікація штамів мікроорганізмів.*

Серед метаноутворюючих бактерій і мікроорганізмів наявні такі, що відрізняються схильністю та підвищеною здатністю до генерації метану. Модифікація їх на клітинному і генному рівні має великі перспективи в напрямку застосування для процесу інтенсифікації виходу та збільшення обсягу вироблення біогазу. Так, наприклад, експерименти з новоствореною бактерією *Methanobacterium kadoensis* St.23, що розроблена японськими дослідниками, показали в результаті можливість зменшити тривалість циклу анаеробного зброджування до 8 діб, замість традиційних 15 - 20 [17]. Крім того, відомі такі нові штучно створені мікроорганізми з підвищеним газоутворенням, як: *Metanococcus*, *Metanobrevibacter*, *Clostridium*, *Methanobacterium*, *Methanospirillum* та інші.

*1.3. Речовини, що позитивно впливають на процеси окислення.*

Зазначені добавки вносяться у вихідний субстрат і виконують функцію каталізатора процесу окислення шляхом приведення до оптимального рівня співвідношення азоту і вуглецю від 1:20 до 1:30, відповідно. Останнє позитивно впливає на загальний процес анаеробного зброджування в частині його інтенсифікації. Крім того, традиційними стимуляторами зростання колоній бактерій з побічним

активним газовиділенням виступають різноманітні ензими та ферменти. Так, до ефективних засобів підвищення продуктивності метантенків відносять такі речовини, як: оцтова кислота, вугілля активоване, вітаміни групи В та мікроелементи, глюкоза, ацетати тощо.

Яскравим прикладом використання такого підходу для інтенсифікації виділення біогазу виступає швейцарська компанія Zorg, яка для метанового зброджування сировини рослинного походження пропонує додавати у субстрат власну розробку із суміші пробіотиків, мікроелементів та ензимів. При незначній витраті субстанції порядку 50 – 100 г/т сухої речовини з силосу отримують збільшення питомої продуктивності біореактору до 40% [18].

Хоча згадані каталізатори і мають ряд недоліків в частині ефективності для обмеженого кола вихідної сировини та індивідуального, як правило, непередбачуваного ефекту від впровадження, до основних переваг їх застосування слід віднести:

- збільшення питомого обсягу виходу біогазової суміші в середньому до 30 - 40%;
- зменшення тривалості циклу анаеробного зброджування за тієї ж продуктивності;
- підтримання рівномірної консистенції субстрату в об'ємі біореактору із запобіганням утворення твердих прошарків на поверхні;
- збільшення вмісту метану в складі біогазової суміші;
- загальне підвищення енергоефективності установки з отримання біогазу за рахунок зменшення технологічних витрат на власні потреби.

#### *1.4. Застосування носіїв для іммобілізації мікроорганізмів.*

Серед наявних найбільш ефективних способів підвищення продуктивності вироблення біогазу шляхом збільшення окисної спроможності в типових біогазових установках виділяють ефект прилипання і утримування на поверхні або так звані адгезію та абсорбцію. Тобто, іммобілізовані мікроорганізми – найпростіші, що зафіксовані на поверхні твердого носія. При цьому відбувається збільшення питомої щільності біомаси в одиниці об'єму реактора та зростає стійкість популяції до негативного впливу навколишнього середовища. Таким чином, ефективність анаеробного зброджування та, відповідно, кількість продукованої біогазової суміші збільшується. Крім того, ефект від іммобілізації мікроорганізмів також залежить від

вибору з широкого спектру відповідних пристроїв, застосування яких сприяє інтенсифікації передачі поживних речовин до клітин, прикріплених до носія мікроорганізмів, та визначає динаміку розвитку та якість всієї популяції.

*2. Технологічні засоби та конструктивні особливості інтенсифікації анаеробного метаноутворення.*

Для підвищення продуктивності установок з отримання біогазу використовують також внесення різноманітних змін до традиційної технології метанового зброджування та різного роду конструктивні модифікації метантенків, що дає значний приріст до обсягу отриманого біогазу. Серед зазначених слід виділити основні.

*2.1. Зміна технології підготовки сировини.*

Фізичні розміри частинок компонентів субстрату суттєво впливають на динаміку та інтенсивність процесів зброджування. Чим вони менші, тим більша їх кількість в конкретному об'ємі сировини, та, відповідно, питома площа їх поверхні, що позитивно відображується на ефективності роботи біогазової установки. Отже, попередня підготовка зазначеного продукту має виключне значення.

Для наведеного вище процесу, а саме приведення біомаси до максимальної однорідності та однакової консистенції, застосовують пристрої ультразвукової обробки та засновані на кавітаційному ефекті гідродинамічні деструктори. Останні широко використовуються для зазначених цілей завдяки відносно простій керованості та ефективності подрібнення сировини даним способом.

Застосування попередньої обробки біологічної сировини подрібненням в кінцевому результаті дозволяє досягти значної кількості позитивних ефектів як з точки зору підвищення енергетичної ефективності біогазового реактору, так і з позиції значної економії матеріальних ресурсів, а саме: дозволяє зменшити тривалість циклу біометаногенезу, що призводить до заощадження теплової енергії на власні потреби для забезпечення температурного режиму в установці; економії капітальних витрат через можливість будівництва біореактору зменшених розмірів за збереження тієї ж продуктивності; вивільнення природних біологічних каталізаторів процесу зброджування біомаси; зменшення піноутворення за рахунок стабілізації процесу метаногенерації та перешкоджає утворенню твердих фракцій у вигляді кірки на поверхні субстрату. Сукупність зазначених ефектів дає приріст вмісту метану в біогазовій суміші до 70-75 % [19].

Одним із дієвих методів підготовки сировини, що також сприяє гомогенізації та попередньому розкладанню твердих речовин у субстраті, є використання ферментації останніх шляхом розділення процесу на фази у спеціальних пристроях – ферментерах. В останніх на першому етапі розщеплюються тверді органічні відходи шляхом розрідження та подрібнення, на другому – традиційний процес метанового збродження з виділенням товарного біогазу та утворенням рідкої фракції добрив. Подібні апарати, що носять назву Anaerobic Phase System (APS), широко впроваджуються швейцарською компанією Zorg Biogas, в основному, для переробки відходів життєдіяльності птахоферм. Біогазові станції, що працюють з використанням даного методу, мають, в середньому, на 20% більшу продуктивність у порівнянні з традиційною технологією.

На рис. 3.20 як приклад наведено типовий процес розділення на фази у єдиному технологічному комплексі, що запатентований компанією Linde-KCA-Dresden GmbH [20, 21]. Тут для підвищення інтенсивності процесу розкладання твердої складової субстрату на першому етапі використовують його постійну безперервну обробку рідиною з вмістом культури бактерій, яка утворюється на другому етапі біометаногенезу. Головною технологічною перевагою зазначеного процесу є виділення для метанового бродіння тільки рідкої складової маси, в той час, як твердий осад з нерозкладених часток відводиться з установки на подальше компостування та складування [20].

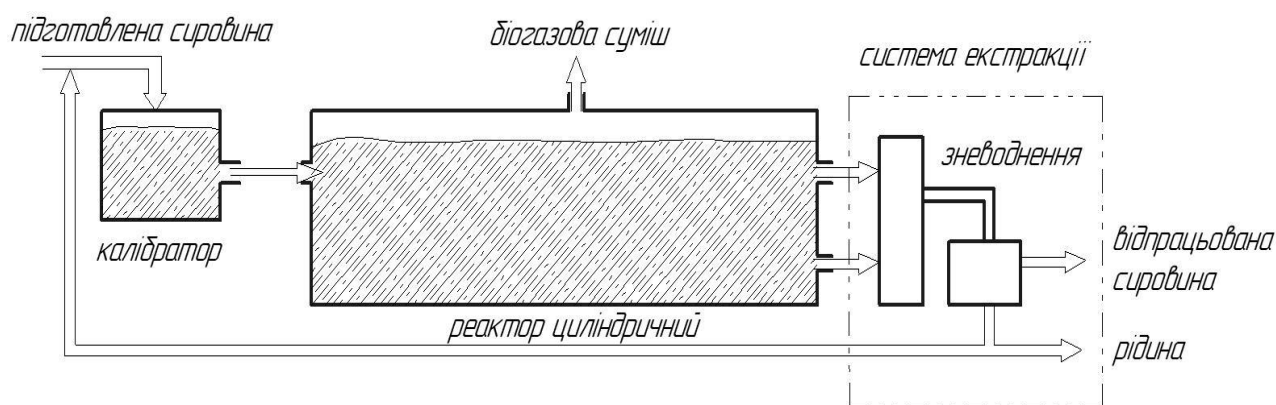


Рис. 3.20. – Розділення на фази процесу збродження.

Проте, зазначена технологія підготовки сировини перед метановим збродженням, у порівнянні з іншими методами інтенсифікації виділення біогазу, є відносно малоефективною, оскільки через її особливості частина високоенергетичної складової

субстрату втрачається. Тому, за можливістю, для впровадження рекомендуються більш ощадні способи попередньої обробки, а кінцеве рішення щодо їх застосування приймається на основі техніко-економічних розрахунків.

Для отримання високоякісних добрив, які для окремих підприємств є переважаючим над біогазом продуктом, використовують спеціальні пристрої для прискореної повної аерації з подальшим компостуванням [6]. В таких установках субстрат підлягає пришвидшеній переробці тривалістю до 90 годин замість 12 – 15 діб шляхом барботажного перемішування у відповідному біореакторі.

Отже, в наявній літературі [15 - 21] представлено широкий перелік способів та методів, заснованих на двофазному процесі переробки органічної сировини, проте вони, поки що, є далекими від стадії впровадження. Тому, традиційне однофазне метанове зброджування на сьогодні є переважаючим та більш розповсюдженим на практиці [22].

### *2.2. Перемішування субстрату.*

Відомо, що перемішування органічної сировини безпосередньо в біореакторі має позитивний для перебігу процесу зброджування ефект [7], а саме: уникнення утворення кірки у верхніх шарах біомаси; сприяє рівномірності температурного та кислотного розподілу; призводить до гомогенізації та однорідності субстрату, а також усуває скупчення твердих включень в камері метантенку. Тому механічні ручні та автоматизовані мішалки досить розповсюджені в біогазових установках для індивідуального використання в умовах фермерських господарств, а також в промислових реакторах малого об'єму для переробки важких субстратів. Для біореакторів великих габаритних розмірів циліндричної та паралелепіпедної форми, як правило, для перемішування використовують направлені потоки рідини або газів, в тому числі, і отриманий безпосередньо тут же біогаз.

### *2.3. Розділення на стадії процесу метанового зброджування.*

Як відомо, процес виробництва біогазової суміші можна умовно розділити на стадії, що відрізняються своєю біологічною сутністю та задіяними в даний період мікроорганізмами, а саме: гідроліз[кислотоутворення та метаногенерація]. Так, прикладом такого підходу є установка, розроблена та впроваджена компанією зі Сполучених Штатів Америки Degremont Technologies. Тут функцію підігріву



субстрату та одночасного перемішування виконують спеціальні перемішувальні пристрої [23], а фази бродіння виглядають наступним чином: перша тривалістю 2 доби – за умов термофільного температурного режиму ферментація відбувається в окремому резервуарі з певним набором мікроорганізмів, друга тривалістю 10 діб – в іншій ємності при дотриманні мезофільних умов 37°C і іншими, притаманними даному етапу, колоніями бактерій. Зазначений підхід реалізовано в згаданому вище пристрої, який зображено на рис. 3.21.

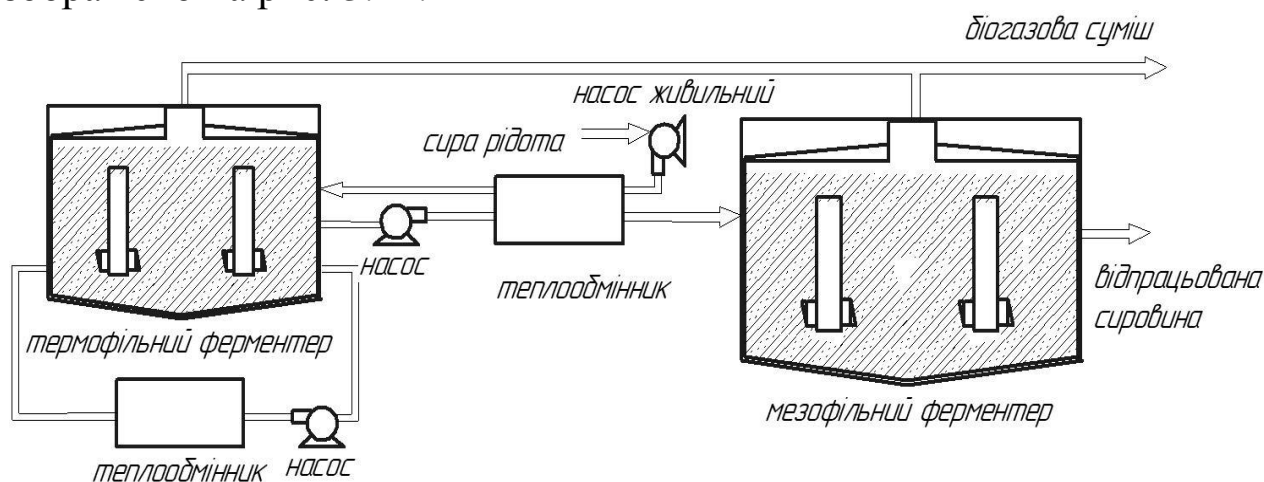


Рис. 3.21. – Установа з розділення на стадії процесу метаноутворення.

#### 2.4. Затримка біомаси в реакційній зоні біореактору

Даний метод пришвидшення розкладання субстрату і інтенсифікації метанового зброджування, заснований на тому, що концентрацію біомаси і, відповідно, поживних речовин, штучно збільшують в конкретній зоні біореактору. Відбувається свого роду хімічна реакція, де у якості агентів виступають насичений мул та субстрат. Недоліком такого методу є ризик недотримання пропорції розчинних органічних речовин, через перевищення вмісту яких в субстраті вище 17%, відбувається пригнічення і затримка розвитку колоній мікроорганізмів і, відповідно, сповільнення або навіть зупинка біологічної конверсії біомаси. Пояснюється останнє утворенням комплексу «субстрат-ензим-субстрат», що за кінетичним рівнянням Міхаеліса-Ментен не здатний до наступних перетворень [23].

Серед сучасних способів підвищення концентрації активних поживних речовин в певній зоні біореактору слід відзначити наступні.

*Анаеробний контакт.* Відома ще з 80-х років минулого століття технологія, яка притаманна безперервнодіючим біореакторам і заснована на частковому поверненні в нього осаду, що був відведений з процесу біоконверсії у відстійник. Запатентований процес, що має назву *Sorting-Digestion-Separation* або *Dry Anaerobic Composting* є поширеним у світі, а подібний цикл для переробки твердих органічних відходів, що застосовується в горизонтальних ферментерах, має назву *Komprogas. Waasa* – ще один різновид технології, розробленої та впровадженої фінськими дослідниками, що заснована на зміні консистенції сировини шляхом розбавлення ззовні рідиною, яку отримано на етапі попереднього зневоднення субстрату [24]. Засівання такої біомаси культурою мікроорганізмів відбувається безпосередньо в ферментері у відповідній камері.

*Затримка активної частини субстрату у вигляді мулу.* Дана технологія розрахована на субстрати з низькою концентрацією та малою щільністю органічних речовин і застосовується, як правило, для очищення стічних забруднених вод. Вона має такий алгоритм: свіжа маса сировини поступає в біореактор за допомогою трубопроводу, який обертається та має отвори у нижній частині; субстрат перемішується з нижніми його шарами і просувається у верхню частину метантенку; за допомогою спеціального пристрою останній знову повертається в реакційну зону.

Для переробки силосу з різних культур в пристроях періодичної дії, застосовують UASB-реактори, які є найбільш розповсюдженими в світі і становлять більше половини усіх біогазових установок [25]. Існують, також, відносно прості технології затримки активної маси, зокрема впроваджена у виробництво німецькою компанією *Wekon Energy Technologies*, яка відрізняється від існуючих тим, що силос в біореакторі піддають зрошуванню теплою рідиною (перколяції), при цьому субстрат переробляється не в гетерофазному середовищі і не потребує перемішування. Завдяки такому підходу, зменшуються як капітальні витрати на більш простий пристрій без застосування мішалки, так і технологічні - електричної енергії на власні потреби, а також збільшується швидкість процесу бродіння [26].

*Анаеробний фільтр.* Принцип дії пристрою полягає в заповненні біореактору відносно габаритними штучними або природними тілами, наприклад, камінцями або пластиковими елементами, які не вступають в реакцію з кислотно-лужним середовищем в середині нього. Принцип дії даного способу полягає в фіксації на їх поверхні

та між ними біомаси, яка не вимивається з метантенку завдяки ним. Метод застосовується, в основному, для очищення стічних побутових і промислових вод, які містять незначну кількість забруднюючих часток [23].

*Фіксація біоплівки в реакторі.* Зазначений біореактор конструктивно виділяється серед інших типових рішень дещо розширеним в нижній частині ложе з набором спеціальних заглиблень, в яких і відбувається фіксація біомаси у вигляді плівок. За технологією, нова партія субстрату розбавляється рідкою фракцією активної маси з попереднього зброджування з додаванням дрібних часток з неорганічних матеріалів [27].

*Створення в реакторі стаціонарних біоплівки.* До особливостей конструкції такого пристрою метанового зброджування слід віднести наявність в ньому касети з вертикально розміщеними металевими, пластиковими або гумовими пластинами, зануреними в субстрат, і на яких відбувається фіксація мікроорганізмів. Збільшення обсягу виробленого біогазу при цьому складає в середньому до 20% [28].

*Затримка осаду і безперервне перемішування.* Біореактори, що працюють за такою технологією, передбачають використання залишкової маси осаду в якості каталізатора процесу метанового зброджування. Тут, свіжа сировина подається через згадану густу фракцію, яка не виводиться наприкінці циклу, а збирається в нижній частині метантенку методом осадження. При цьому, мішалки працюють безперервно протягом метанового зброджування і зупиняються тільки на час збору згаданої речовини.

### 2.5. Температура

На процеси анаеробного зброджування, як зазначалося вище, виключне значення має температурний режим. При зниженні її в реакторі, зменшується інтенсивність генерації біогазу, оскільки мікробіологічні процеси в органовмісній масі субстрату сповільнюються, а загальна енергоефективність роботи біореактору падає. Тому, якісна теплоізоляція реактора, задля можливості дотримання необхідного температурного режиму, одна з основних умов його ефективного функціонування.

Для забезпечення високої продуктивності установки з отримання товарного біогазу, як правило, використовуються два методи підігріву субстрату, що мають свої переваги та недоліки: прямий та непрямий. Перший – реалізується за допомогою гарячої води або пари, другий – через контур теплообмінного апарату. Проте,

велика кількість біореакторів як індивідуальних приватних, так і промислового масштабу, побудовано з ігноруванням значення теплоізоляції і навіть без системи підігріву. Останнє призводить до неможливості роботи метантенку в будь-якому іншому температурному режимі, крім малоефективного психрофільного.

Прямий підігрів використовують задля забезпечення необхідного режиму ферментації шляхом змішування субстрату безпосередньо з водою температурою 35 - 40°C. Спосіб дозволяє доводити біомасу до температурної позначки 30 - 32°C і вологості 90 - 95%, при яких спостерігаються найкращі для мезофільного режиму результати. Застосування пари для зазначеної мети має ряд недоліків, а саме: можливе локальне перегрівання субстрату, складність та коштовність додаткового обладнання генерації пари, наявність складної в обслуговуванні установки з очищення води від солей, побічне збільшення вмісту вологи в біогазі.

Непрямий підігрів, як правило, реалізується через теплообмінники, які конструктивно можуть бути розташовані всередині або назовні біореактора, Носієм теплової енергії в них виступає рідина з оптимальною температурою близько 60°C, оскільки перевищення цього значення може призвести до скупчення субстрату в перегрітій зоні та є шкідливим для живих мікроорганізмів. Зазначені пристрої, також, можуть бути вмонтовані в стінки реактора, наприклад, такого, що складається з двох камер та має внутрішню перегородку.

Зовнішній обігрів застосовують тільки там, де надійна високоточна підтримка температурного режиму має виключне значення. Останній вимагає наявності насосної системи примусової циркуляції субстрату, що підвищує капітальні вкладення в реалізацію таких біоенергетичних установок. А до переваг такого підходу слід віднести практично однакову температуру свіжого та наявного в біореакторі субстрату, через що реакція біоконверсії починається набагато швидше, а також спрощене обслуговування та ремонт всієї установки нагріву через зовнішнє розташування теплообмінних апаратів.

Отже, інтенсифікація процесу збродження біомаси та отримання біогазової суміші за рахунок впровадження перелічених технологічних та конструктивних рішень дозволяє збільшити обсяг і якісні показники біогазу з побічним виробленням високоякісних органічних добрив. Серед найбільш ефективних методів слід

виділити такі, що засновані на створенні в об'ємі біореактору гомогенізованої однорідної маси та забезпечують рівномірність температури в шарі субстрату завдяки використанню попередньої підготовки біомаси і удосконаленню окремих частин реактора.

**Перелік використаних джерел:**

1. Головне управління статистики у м. Київ : URL:<http://kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=2545&lang=1>.
2. Фінансовий стан підприємств України: аналітичний статистичний огляд / Школьник І. О. та ін. Суми : ДВНЗ «УАБС НБУ», 2013. 69 с.
3. Україна в цифрах : веб сайт. URL: [https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat\\_u/publ1\\_u.htm](https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/publ1_u.htm).
4. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг : веб сайт. URL:<http://www.nerc.gov.ua/?id=18960>.
5. Eder B., Schultz H. Biogas plants. A practical guide. Zorg Biogas, 2011. P. 181
6. Куріс Ю. В., Червоний І. Ф. Біогазові технології. Енергетичні та екологічні аспекти : монографія. РВВ ЗДІА, 2010. 488 с.
7. Баадер В. Биогаз : теория и практика / пер. с нем. и предисловие И. М. Серебряного. Москва : Колос, 1982. 149 с.
8. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні : Аналітична записка. № 11. Київ, Біоенергетична асоціація України, 2014. 42 с.
9. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України: <http://www.saee.gov.ua/uk/news/2270>.
10. Біогазові проекти в Україні: перспективи, наслідки та регуляторна політика / Г. С. Трипольська. Екон. prognozuvannâ. 2018. № 2. P. 111–134. DOI: <https://doi.org/10.15407/eip2018.02.111>
11. Коваленко В. Л., Качан Ю. Г., Лапікова О. І., Аналіз ефективності та перспектив розвитку біогазової енергетики. Журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2015. Вип. № 3(41). С. 79 – 83.
12. Eder B., Schultz H. Biogas plants. A practical guide edited by IA Reddich, Zorg Biogas, 2011. P. 175.
13. Полищук В. Н., Дубровин В. А., Полищук А. В. Энергетический баланс метантенка биогазовой установки: веб сайт. URL: <http://www.sworld.com.ua/konfer34/512.pdf>.

14. Петров С. В., Решетникова И.В., Вохмин В. С. Применение электротехнологий при метановом сбраживании отходов. *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 21, т. 3. С.55 – 58.
15. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405 – 412.
16. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування. *Науковий вісник Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту*. 2014. Вип 4, т.1. с. 3–9.
17. Шацький В. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Солодка О. О. Вплив структури субстрату на вихід біогазу при метановому зброджуванні. *Праці Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту*. 2013. Вип. 13, т 3. С. 3 – 12.
18. Биогазовые установки. Практическое пособие : веб сайт. URL: [http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas\\_plants\\_Practics.pdf/](http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf/).
19. Веденев А. Г., Веденева Т. А. Биогазовые технологии в Кыргызской Республике. Бишкек : Типография «Евро», 2006. 90 с.
20. Nichols C. E. Overview of anaerobic digestion technologies in Europe. *BioCycle*. 2014. V. 45, №1. P. 47–53.
21. Linde engineering : веб сайт. URL : <https://www.linde-engineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/index.html>.
22. Nizami A. S., Murphy J. D. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. P. 1558 – 1568. DOI: 10.1016/j.rser.2010.02.006.
23. Ю. І. Сидоров Сучасні біогазові технології. *Biotechnologia ACT*. 2013. V. 6, № 1. P. 46 – 61.
24. Энергия биомассы. Проект ПРООН/ГЭФ ВУЕ/03/G31 в Беларуси. Gerhard Ulz. Bauherren mappe biogaz : веб сайт. URL: [energoeffekt.gov.by/bioenergy/htdocs/mejdu.htm](http://energoeffekt.gov.by/bioenergy/htdocs/mejdu.htm).
25. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.* 2013. № 25. P. 294 – 306.
26. Bekon minio From single components to keyturn : веб сайт. URL: [http://www.bekon.eu/wpcontent/upl/2017/04/BrochureBEKON\\_MIN\\_I\\_EN.pdf](http://www.bekon.eu/wpcontent/upl/2017/04/BrochureBEKON_MIN_I_EN.pdf).
27. Колесников В. П., Вильсон Е. В. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях : Ростов-на-Дону : Юг, 2005. 212 с.